



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΟΡΥΚΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

ΚΟΥΛΕΤΣΗΣ ΜΑΡΙΟΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΑΛΚΙΝΟΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ :

Καθ. ΒΑΦΕΙΔΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ (Επιβλέπων)

Αναπλ. Καθ. ΠΑΡΤΣΙΝΕΒΕΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Δρ. ΚΡΗΤΙΚΑΚΗΣ ΓΙΩΡΓΟΣ, Ε.ΔΙ.Π.

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021

«Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών»

Στην Μητέρα μου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της οικογένειας μου, χωρίς την βοήθεια και την υποστήριξη των οποίων δεν θα είχα καταφέρει να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την ανάθεση αλλά και τον γενικό συντονισμό αυτής, καθηγητή κ. Βαφείδη Αντώνιο.

Ακολούθως, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλονται στον διδάκτορα κ. Κρητικάκη Γεώργιο, ο οποίος αποτελεί μέλος Ε.ΔΙ.Π. της Σχολής ΜΗΧ.Ο.Π. και μέλος της εξεταστικής επιτροπής της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς ήταν ο βασικός συντονιστής της και χωρίς την βοήθεια του δεν θα είχε υλοποιηθεί η δημιουργία και η επεξεργασία των συνθετικών δεδομένων των επιφανειακών κυμάτων. Τον ευχαριστώ επίσης για την άψογη συνεργασία του, αλλά και για την υπομονή και επιμονή του, για την πλήρη κάλυψη και επίλυση αποριών μου, που προέκυψαν κατά την διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Τέλος, εκφράζω τις ευχαριστίες μου στον/στην καθηγητή/τρια που αποτέλεσε μέλος της εξεταστικής επιτροπής, για τις στοχευμένες παρατηρήσεις του/της, ο/η οποίος/α αντικατέστησε τον Αναπληρωτή καθηγητή κ. Μαθιουδάκη Εμμανουήλ έπειτα από τον άδικο χαμό του.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας και μελέτης της διάδοσης επιφανειακών σεισμικών κυμάτων καθίσταται υψίστης σημασίας για την ορθότητα του σχεδιασμού κατασκευών καθώς και της σωστής μελέτης του υπεδάφους για την απόκριση αυτού σε πιθανή σεισμική δραστηριότητα.

Το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση προσομοιωτών διάδοσης επιφανειακών κυμάτων. Συγκεκριμένα, η σύγκριση πραγματοποιήθηκε μεταξύ των αλγορίθμων PSV – SYNTHETICS και SW4. Οι αλγόριθμοι αυτοί χρησιμοποιούν την μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών, για την επίλυση της κυματικής εξίσωσης στις 2 (2D) και 3 (3D) διαστάσεις, που αναπτύχθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Πολυτεχνείου Κρήτης και στο Τμήμα Γεωδυναμικής Υπολογιστικής Υποδομής του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια (Η.Π.Α), αντίστοιχα.

Η εργασία αναπτύχθηκε αρχικώς με μια γενικευμένη προσέγγιση της κυματικής θεωρίας και της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Στην συνέχεια, επικεντρώνεται στα επιφανειακά σεισμικά κύματα και στις εφαρμογές που αυτά βρίσκουν χρήση. Σημαντική αναφορά γίνεται σε έννοιες όπως η διασπορά, οι καμπύλες διασποράς και η αντιστροφή αυτών. Οι έννοιες αυτές αποτελούν τους πυλώνες επεξεργασίας των επιφανειακών κυμάτων.

Ακολούθως, ορίστηκαν και αναλύθηκαν οι κυριότερες αριθμητικές μέθοδοι προσομοίωσης της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Οι αριθμητικές μέθοδοι που παρουσιάζονται είναι η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, η μέθοδος των Πεπερασμένων Διαφορών και η Ψευδοφασματική μέθοδος.

Σημαντικό μέρος της εργασίας αυτής αναλώνεται στην παρουσίαση των αλγορίθμων PSV – SYNTHETICS και SW4 όπου πραγματοποιείται και η ανάλυση της ιδιαιτερότητας των 2 αλγορίθμων, καθώς και των συνθηκών που απαιτείται να πληρούν τα μοντέλα για να είναι δυνατή η ακριβής προσομοίωση της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων.

Και για τους 2 αλγορίθμους μελέτης, δημιουργήθηκε μια σειρά μοντέλων 2 κατηγοριών. Ένα μοντέλο ομοιογενούς ημιχώρου και 4 μοντέλα με οριζόντια στρώματα. Οι μελετώμενες παράμετροι της προσομοίωσης (διακριτοποίηση μοντέλων και απόσταση

δεκτών από την πηγή) και τα αποτελέσματα της (καταγραφές και καμπύλες διασποράς) παρουσιάζονται και αναλύονται.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη σύγκριση των καμπυλών διασποράς με την αντίστοιχη αναλυτική λύση για κάθε μοντέλο μελέτης. Σε κάθε περίπτωση, εκτιμήθηκε η μέση απόλυτη εκατοστιαία απόκλιση καθώς και η μέση τυπική απόκλιση.

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων προέκυψε ότι οι αλγόριθμοι του SW4 υπερτερούν έναντι των αντίστοιχων του PSV - SYNTHETICS εφόσον επιτυγχάνουν πολύ μικρότερα σφάλματα συγκριτικά με τις αναλυτικές λύσεις. Ειδικότερα, στο μοντέλο του ομοιογενούς μέσου, το ελάχιστο παρατηρούμενο σφάλμα μεταξύ πειραματικής και αναλυτικής λύσης ήταν της τάξης του 0.1% και 5.0% με την χρήση των αλγόριθμων SW4 και PSV-SYNTHETICS, αντίστοιχα. Για τα πολυστρωματικά, το ελάχιστο παρατηρούμενο σφάλμα ήταν της τάξης του 0.4% και 5.0%, αντίστοιχα.

Τέλος, παρατηρήθηκε συχνοτική υποβάθμιση των συνθετικών δεδομένων που δημιουργήθηκαν με τους αλγόριθμους, PSV – SYNTHETICS, η οποία μελετήθηκε. Συμπερασματικά προέκυψε πως οι συνοριακές συνθήκες της ελεύθερης επιφάνειας στην συγκεκριμένη μέθοδο, δημιουργούν επιφανειακά κύματα με κυρίαρχη συχνότητα σημαντικά μικρότερη (25 Hz) από την σεισμική διέγερση που δημιουργεί αρχικά η σεισμική πηγή (50 Hz). Αντίθετα, τα απευθείας κύματα, στο ομοιογενές μοντέλο με ελεύθερη επιφάνεια, παρουσιάζουν κυρίαρχη συχνότητα λίγο μεγαλύτερη (60 Hz) από αυτή της πηγής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	3
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ	3
2.1 ΕΙΔΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	3
2.1.1 Κύματα Χώρου	4
2.1.2 Επιφανειακά κύματα και τα χαρακτηριστικά τους	5
2.2 Εφαρμογές των επιφανειακών κυμάτων	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	11
ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	11
3.1 ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ	11
3.1.1 Κυματική Εξίσωση	11
3.1.2 Αριθμητικές μέθοδοι προσομοίωσης της διάδοσης των σεισμών	12
3.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ SW4	17
3.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ PSV-SYNTHETICS	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	21
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	21
4.1 Περιγραφή μοντέλων προσομοίωσης	21
4.1.1 Μοντέλο ομοιογενούς ημιχώρου.....	22
4.1.2 Μοντέλα οριζόντια στρωματωμένου μέσου	25
4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο ομοιογενούς ημιχώρου	33
4.2.1 Αποτελέσματα αλγόριθμων PSV-SYNTHETICS	34
4.2.2 Αποτελέσματα αλγόριθμων SW4.....	36
4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τα οριζόντια στρωματωμένου μέσου μοντέλα .	41
4.3.1 Αποτελέσματα αλγόριθμων PSV-SYNTHETICS	41
4.3.2 Αποτελέσματα αλγόριθμων SW4.....	43

4.4 Μελέτη υποβάθμισης συχνότητας αλγορίθμων PSV – SYNTHETICS	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	55
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	58
ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ	58
ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΥΚΤΙΟ & ΑΛΛΕΣ ΠΗΓΕΣ	60
Παράρτημα Α'	62
Παράρτημα Β'	73
Παράρτημα Γ'	92
Παράρτημα Δ'	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κύριο αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας εστιάζεται στην σύγκριση προσομοιωτών διάδοσης σεισμικών επιφανειακών κυμάτων Rayleigh, μεταξύ 2 διαφορετικών σχημάτων Πεπερασμένων Διαφορών που εξετάστηκαν. Ο πρώτος προσομοιωτής ονομάζεται SW4, ενώ ο δεύτερος PSV – SYNTHETICS.

Τα επιφανειακά κύματα λαμβάνουν καθοριστικό ρόλο στην ανθρώπινη καθημερινότητα αλλά και στη διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής, διότι μέσω της μελέτης τους, προκύπτουν σημαντικές πληροφορίες για την μηχανική συμπεριφορά του ρηχού υπεδάφους. Έτσι, η δυνατότητα δημιουργίας βέλτιστων επιφανειακών αλλά και υπόγειων κατασκευών γίνεται εφικτή. Επίσης, η μελέτη των επιφανειακών κυμάτων οδηγεί στην αξιολόγηση και λήψη κρίσιμων αποφάσεων για την προστασία των κατασκευών από σεισμική δραστηριότητα.

Ως αρχικό στάδιο της παρούσας διατριβής, γίνεται αναφορά στα είδη των σεισμικών κυμάτων, δηλαδή στα κύματα χώρου και στα επιφανειακά κύματα. Εκεί αναδεικνύεται η φυσική και η μηχανική τους συμπεριφορά ως προς τα διάφορα μέσα που μπορούν να διαδοθούν, καθώς και τα χαρακτηριστικά από τα οποία διέπονται. Ακολούθως, γίνεται εκτενέστερη αναφορά στα είδη των επιφανειακών κυμάτων και στον τρόπο διάδοσης τους εντός ελαστικού στερεού όπως είναι η Γη. Έπειτα, παρουσιάζεται το φαινόμενο της διασποράς και αναλύονται εκτενέστερα οι καμπύλες διασποράς των επιφανειακών κυμάτων. Η αντιστροφή των καμπυλών διασποράς και η σύγκριση της θεωρητικής με την πειραματική καμπύλη αντιστοιχεί στη μέθοδο επεξεργασίας των καταγραφών που προκύπτουν από την διαδικασία των προσομοιώσεων αυτής της εργασίας.

Στην συνέχεια της εργασίας παρουσιάζονται εφαρμογές των επιφανειακών κυμάτων ανάλογα με τις μεθόδους επεξεργασίας που έχουν αναπτυχθεί. Τέτοιες μέθοδοι είναι η πολυκάναλη ανάλυση επιφανειακών κυμάτων (MASW), η φασματική ανάλυση επιφανειακών κυμάτων (SASW) και η αναλογία φασμάτων οριζόντιας προς κατακόρυφη εδαφική κίνηση (λόγος H/V).

Το επόμενο στάδιο της εργασίας ξεκινάει με την περιγραφή της κυματικής εξίσωσης καθώς και αναφορά κάποιων κλάδων που βρίσκει εφαρμογή. Έπειτα, ακολουθεί η ανάλυση των αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element method), η μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών (Finite Differences method) και η Ψευδοφασματική μέθοδος (Pseudo Spectral method).

Για την επίτευξη των προσομοιώσεων διάδοσης σεισμικών κυμάτων στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι αλγόριθμοι SW4 και PSV – SYNTHETICS, οι οποίοι βασίζονται στη μέθοδο των Πεπερασμένων Διαφορών. Η μέθοδος SW4 χρησιμοποιείται για τρισδιάστατα μοντέλα υψηλής ακρίβειας, αντίθετα η μέθοδος PSV – SYNTHETICS πραγματοποιεί προσομοίωση διάδοσης P και SV κυμάτων σε δισδιάστατα μοντέλα.

Ακόλουθο στάδιο στην εργασία αποτελεί η περιγραφή της διαδικασίας της δημιουργίας μοντέλων αλλά και της επεξεργασίας των συνθετικών δεδομένων. Συνολικά δημιουργήθηκαν 2 είδη μοντέλων: ομοιογενούς ημιχώρου και μοντέλα με οριζόντια στρώματα. Επίσης, περιγράφεται αναλυτικά η γεωμετρία των εκάστοτε μοντέλων καθώς και οι παράμετροι από τις οποίες διέπονται.

Οι συνθετικές σεισμικές καταγραφές που προέκυψαν έπειτα από τις πολύωρες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, παρατίθενται σε επόμενο στάδιο της εργασίας. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης προκύπτει από την σύγκριση της πειραματικής καμπύλης με την αναλυτική λύση. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω των αλγορίθμων του kriSIS, η οποία λειτουργεί εντός περιβάλλοντος Matlab. Τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας είναι η δημιουργία του ποσοστιαίου απολύτου σφάλματος μεταξύ πειραματικών καμπυλών διασποράς και αναλυτικής λύσης (θεωρητικών καμπυλών διασποράς) για το εκάστοτε μοντέλο προσομοίωσης και η σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων.

Το τελικό στάδιο της εργασίας καταλαμβάνουν τα συμπεράσματα, καθώς και οι προτάσεις που επισημαίνονται για περεταίρω έρευνα.

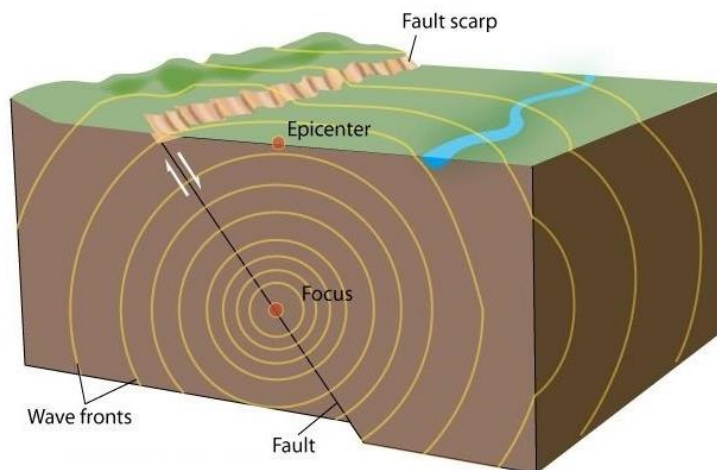
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ

2.1 ΕΙΔΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Τα σεισμικά κύματα δημιουργούνται μέσω φυσικών και τεχνικών μηχανισμών. Ως φυσικοί μηχανισμοί, χαρακτηρίζονται οι δραστηριότητες του φλοιού και της επιφάνειας της Γης όπως, η μετακίνηση των τεκτονικών τεμάχων (Σχήμα 2.1), η ηφαιστειακή δραστηριότητα και η καθίζηση του εδάφους. Αντίθετα, τεχνικοί τρόποι παραγωγής σεισμικών κυμάτων υλοποιούνται μέσω ελεγχόμενων εκρήξεων ή μέσω της χρήσης μηχανημάτων παραγωγής κρούσεων στην επιφάνεια του εδάφους (Sciencelearn, 2007).

Οι προαναφερθείσες σεισμικές πηγές, απελευθερώνουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Η ενέργεια αυτή (σεισμικό κύμα) παρουσιάζει διακυμάνσεις ως προς τον τρόπο διάδοσης της στο μέσο (Perkins, 2018). Η κυματομορφή των σεισμικών κυμάτων μεταβάλλεται ως συνάρτηση της απόστασης από τη σεισμική πηγή, του χρόνου διάδοσης και των φυσικών χαρακτηριστικών των κυμάτων (Κρητικάκης, 2000).



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση σεισμικής εστίας, επικέντρου και διάδοσης σεισμικού κύματος (Sciencelearn, 2007)

Ένας τρόπος διάδοσης των σεισμικών δονήσεων γίνεται μέσω της εγκάρσιας κίνησης των υλικών σημείων δηλαδή, μέσω της κάθετης διεύθυνσης ταλάντωσης τους, στη διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων. Τα διαμήκη κύματα είναι ο δεύτερος τρόπος διάδοσης των σεισμικών κυμάτων κατά τα οποία τα υλικά σημεία ταλαντώνονται σε παράλληλη διεύθυνση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Σύμφωνα με τον τρόπο διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, των χαρακτηριστικών του εκάστοτε κύματος αλλά και του μέσου διάδοσης του, τα κύματα διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης (κύματα χώρου) ή κοντά στην επιφάνεια της (επιφανειακά κύματα) (Perkins, 2018).

2.1.1 Κύματα Χώρου

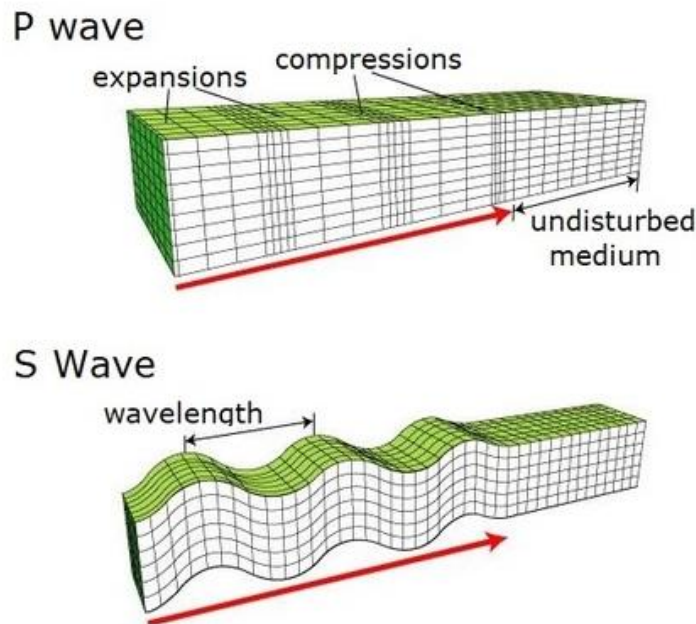
Τα κύματα χώρου διακρίνονται σε διαμήκη – P (primary) και διατμητικά – S (secondary) κύματα. Τα κύματα P είναι τα πρώτα κύματα που καταγράφονται σε έναν σειсмоγράφο. Αυτό οφείλεται στην ταχύτητα τους η οποία είναι η υψηλότερη που δημιουργεί μία σεισμική πηγή (BGS, 2017). Χαρακτηριστικές τιμές ταχυτήτων διαμηκών κυμάτων είναι οι ακόλουθες:

- 5 – 7 km/s στον συμπαγή φλοιό της Γης
- > 8 Km/s στο μανδύα και στον πυρήνα
- 1.5 km/s στο νερό
- 0.3 km/s στο αέρα

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση ταχυτήτων διαμηκών κυμάτων, όσον αφορά στο μέσο διάδοσης συμπεραίνεται πως η κίνηση των P κυμάτων πραγματοποιείται εντός στερεών, υγρών και αέριων μέσων. Η κίνηση που περιγράφει αυτό το είδος κυμάτων είναι η εναλλαγή πυκνωμάτων και αραιωμάτων (Σχήμα 2.2) (BGS, 2017).

Τα διατμητικά κύματα αντίθετα, διαδίδονται μόνον εντός στερεών μέσων. Κινούνται με χαμηλότερες ταχύτητες από αυτές των διαμηκών κυμάτων. Έτσι, αποτελούν την αμέσως επόμενη κατηγορία κυμάτων που καταγράφονται στον σειсмоγράφο (BGS, 2017). Τυπικές ταχύτητες των διατμητικών κυμάτων είναι:

- 3 – 4 km/s στο συμπαγή φλοιό της Γης
- 4.5 km/s στο μανδύα της Γης

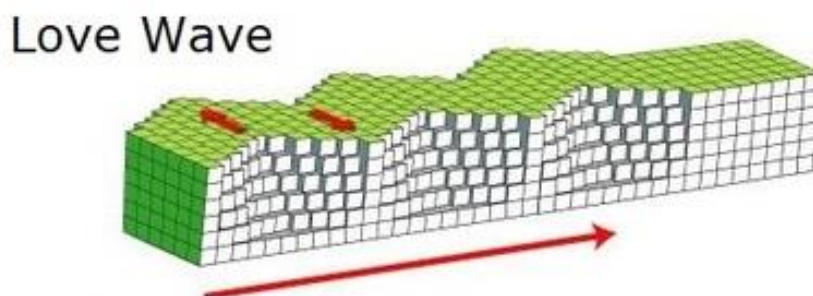


Σχήμα 2.2 : Αναπαράσταση κίνησης P και S κυμάτων (Sciencelearn, 2007).

2.1.2 Επιφανειακά κύματα και τα χαρακτηριστικά τους

Μια επιμέρους κατηγορία σεισμικών κυμάτων είναι τα επιφανειακά κύματα. Γενικότερα, ως επιφανειακά κύματα ορίζονται αυτά που διαδίδονται παράλληλα με διεπιφάνειες. Τα κυριότερα και πιο γνωστά είδη επιφανειακών κυμάτων είναι τα κύματα Love και Rayleigh. Υπάρχουν ωστόσο και τα σωληνοκύματα (tube waves) που διαδίδονται στα τοιχώματα των γεωτρήσεων, τα κύματα Sholte (διεπιφάνεια νερού – στερεού) και τα Stoneley (διεπιφάνεια στερεού – στερεού). Στην κατηγορία αυτή, τα είδη των κυμάτων που την απαρτίζουν έχουν μικρότερες σεισμικές ταχύτητες από τα κύματα χώρου. Επίσης, το πλάτος κύματος τους είναι αρκετά μεγάλο, γεγονός που καθιστά τα κύματα Rayleigh και κυρίως τα κύματα Love ως τον πιο καταστροφικό τύπο σεισμικών κυμάτων σε περιπτώσεις σεισμών (Seismicresilience, 2015).

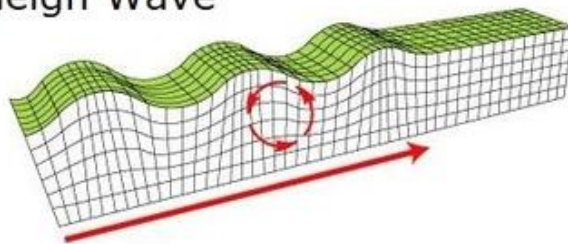
Τα κύματα Love πήραν το όνομα τους από τον Βρετανό σεισμολόγο A.E.H. Love, ο οποίος ήταν ο πρώτος που προέβλεψε την ύπαρξη τους (Abhinav, 2012). Τα κύματα αυτά προκύπτουν από την συμβολή διατμητικών κυμάτων S, που υπόκεινται σε ολική ανάκλαση εντός επιφανειακών στρωμάτων διάδοσης με χαμηλή ταχύτητα. Η χαμηλή ταχύτητα είναι προαπαιτούμενο για την ύπαρξη των επιφανειακών κυμάτων Love. Η κίνηση τους περιορίζεται αποκλειστικά στην οριζόντια διεύθυνση και τα σωματίδια ταλαντώνονται κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος (Σχήμα 2.3). Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της δομής του φλοιού της Γης και στη συνέχεια για την εκτίμηση της σεισμικής ταχύτητας στο αποσαθρωμένο στρώμα η οποία απαιτείται στις στατικές διορθώσεις των ανακλώμενων S κυμάτων (Steeple, 2000).



Σχήμα 2.3: Διάδοση κύματος Love σε υλικά σημεία σχηματισμού (Sciencelearn, 2007).

Τα επιφανειακά κύματα Rayleigh πήραν το όνομα τους από τον Άγγλο φυσικό Rayleigh, ο οποίος πρώτος απέδειξε την ύπαρξη τους μέσω των μαθηματικών σχέσεων που τα προβλέπουν. Τα κύματα Rayleigh διαδίδονται κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας ενός ελαστικού στερεού όπως η Γη. Η κίνηση τους είναι ένας συνδυασμός συμπίεσης και διάτμησης που οδηγεί σε ελλειπτική κίνηση των σημείων από τα οποία διέρχονται (Σχήμα 2.4). Από όλα τα σεισμικά κύματα, τα κύματα Rayleigh διασπείρονται περισσότερο στη διάρκεια του χρόνου κυρίως σε μακρινές θέσεις παρατήρησης από την πηγή, με αποτέλεσμα να έχουν την μακροβιότερη διάρκεια ανίχνευσης από τους σειсмоγράφους (Abhinav, 2012).

Rayleigh Wave



Σχήμα 2.4: Διάδοση Rayleigh κύματος σε υλικά σημεία σχηματισμού (Sciencelearn, 2007).

Ως επιφανειακά κύματα, τα χαρακτηριστικά τους περιορίζονται σε περιοχές κοντά στην επιφάνεια της Γης. Έτσι, κατά την διάδοση της κίνησης τους σε μεγαλύτερο βάθος, το πλάτος κίνησης αποσβένει με ραγδαίο ρυθμό (Κρητικάκης, 2000).

Βασικό χαρακτηριστικό των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh αποτελεί το φαινόμενο της διασποράς. Με τον όρο διασπορά νοείται η αλλαγή των χαρακτηριστικών ενός σεισμικού κύματος όπου η ταχύτητα του ποικίλλει αναλόγως της συχνότητας. Επιφανειακά κύματα και ηλεκτρομαγνητικά χωρικά κύματα συνήθως εμφανίζουν το φαινόμενο της διασποράς (dispersion - Schlumberger Oilfield Glossary, 2020).

Στα επιφανειακά κύματα Rayleigh παρουσιάζεται το φαινόμενο της διασποράς με την ταχύτητα διάδοσης να εξαρτάται από τη συχνότητα. Η διασπορά των κυμάτων χώρου είναι αμελητέα και οφείλεται στις ενεργειακές αποσβέσεις που υφίστανται τα κύματα, κυρίως υπό τη μορφή θερμότητας (Κρητικάκης, 2010).

Η υλική διασπορά και η διασπορά εξαιτίας γεωμετρικών μεταβολών των ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών είναι οι δύο διακριτές μορφές του φαινομένου αυτού, των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh (Κρητικάκης, 2010).

Το φαινόμενο της διασποράς εμφανίζεται αποκλειστικά σε γεωλογικούς σχηματισμούς με διαφοροποίηση στις τιμές της πυκνότητας και της ταχύτητας διάδοσης κατά την αύξηση του βάθους. Οι καμπύλες διασποράς αντιπροσωπεύουν τον τρόπο διάδοσης ενός κύματος για μια δεδομένη γεωμετρία του υπεδάφους. Τα πεδία απεικόνισης και μελέτης των καμπυλών διασποράς είναι: της συχνότητας – κυματοαριθμού ($f - k$), του μήκους κύματος – συχνότητας ($\lambda - f$), της ταχύτητας φάσης – συχνότητας ($c - f$) και της ταχύτητας ομάδας – συχνότητας ($V - f$). Τα παραπάνω πεδία απεικόνισης των καμπυλών

διασποράς επιτρέπουν την παρατήρηση της διασποράς ενός κύματος (Becker, Iturrioz and Clarke, 2018).

Στόχος της μελέτης των καμπυλών διασποράς είναι η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων. Βασικός παράγοντας για την ανάλυση αυτών, είναι η δυνατότητα ανίχνευσης των καμπυλών διασποράς από το πλήθος των καταγραφών καθώς και η αντιστροφή τους. Η ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh χωρίζεται: πρώτον, στο τμήμα της δημιουργίας πειραματικών καμπυλών διασποράς από σεισμικές καταγραφές κοινής πηγής και δεύτερον, στο τμήμα της εκτίμησης θεωρητικών καμπυλών διασποράς για ένα οριζόντια στρωματωμένο μέσο ως αρχικό μοντέλο. Από την επαναληπτική τροποποίηση του αρχικού μοντέλου κατά τη διαδικασία αντιστροφής των καμπυλών διασποράς, γίνεται η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης διασποράς στην πειραματική (Kritikakis et al., 2004). Το τελικό μοντέλο (κατανομή της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων (V_s) με το βάθος) προκύπτει όταν επιτευχθεί η προσαρμογή, στο πλαίσιο ενός αποδεκτού σφάλματος, θεωρητικής στην πειραματική καμπύλη διασποράς.

2.2 Εφαρμογές των επιφανειακών κυμάτων

Η μελέτη των επιφανειακών κυμάτων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη διάφορων μεθόδων. Οι μέθοδοι διακρίνονται ανάλογα με την ανάγκη των εφαρμογών. Μερικές από τις μεθόδους που θα αναπτυχθούν παρακάτω είναι η ενεργητική και η παθητική MASW, η SASW και η H/V.

Η πολυκάναλη ανάλυση επιφανειακών κυμάτων (MASW) διαχωρίζεται στην ενεργητική και παθητική ανάλυση. Η ενεργητική MASW είναι η πιο κοινή μέθοδος της MASW που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ψευδοτομών ταχύτητας V_s . Η λήψη δεδομένων υλοποιείται μέσω της συμβατικής διαδικασίας, δηλαδή μέσω μιας ενεργητικής σεισμικής πηγής (π.χ. σφυρί) και μιας γραμμικής διάταξης δεκτών. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, τα επιφανειακά κύματα εξαπλώνονται οριζόντια κατά μήκος της επιφάνειας κατευθείαν από την πηγή στους δέκτες. Οι μετρήσεις οδηγούν στον προσδιορισμό της διατμητικής ταχύτητας V_s τόσο για την μία διάσταση (βάθος) όσο και για τις 2 διαστάσεις υπό μορφή ψευδοτομής. Το μέγιστο βάθος διασκόπησης της μεθόδου αυτής είναι 10-30 m όμως αυτό μπορεί να ποικίλλει από το είδος της πηγής (Park et al., 2007). Αντίθετα, η παθητική MASW προέκυψε καθώς τέθηκε ανάγκη αύξησης του βάθους διασκόπησης, το

οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της μείωσης της συχνότητας της πηγής. Ορισμένες φορές αυτή η μέθοδος καθίσταται μη πρακτική και αντισυμβατική. Τα επιφανειακά κύματα στη μέθοδο αυτή παράγονται είτε φυσικά (π.χ. παλίρροιες) είτε τεχνητά (π.χ. οδική κίνηση) και χαρακτηρίζονται από χαμηλές συχνότητες (1-30Hz) με μήκη κύματος από μερικά χιλιόμετρα (φυσικές πηγές) έως μερικές δεκάδες μέτρα (πηγές ανθρώπινης δραστηριότητας) αντίστοιχα, παρέχοντας ένα μεγάλο εύρος βάθους διεξόδου (Park et al., 2007).

Ενδεικτικά οι εφαρμογές της πολυκάναλης ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων (MASW) που έχουν αναπτυχθεί είναι (MASW, Park Seismic LLC, n.d.)

- Η χαρτογράφηση του εδαφικού υποβάθρου (Soil – Bedrock Mapping). Τα δεδομένα που προκύπτουν εξάγουν τη γεωμετρία του υποβάθρου και ερμηνεύονται με βάση τις παρατηρήσεις που προέρχονται από τις ταχύτητες των διατμητικών κυμάτων.
- Ο χαρακτηρισμός των επιπτώσεων ενός σεισμού σε μια περιοχή μέσω της αξιολόγησης της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων έως βάθος 30 m (V_{s30}).
- Η αξιολόγηση της τεχνητής εδαφικής συμπίεσης που πραγματοποιείται στην οδοποιία, στην δημιουργία αναχωμάτων κλπ.
- Η αξιολόγηση των τσιμεντενέσεων στο υπέδαφος. Η εφαρμογή αυτή μελετά σε 3 χρόνους, πριν και κατά το πέρας της εφαρμογής τσιμεντενέσεων στο υπέδαφος, την διαφοροποίηση της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων Vs. Η πάροδος του χρόνου οδηγεί στην αύξηση της ταχύτητας Vs γεγονός που υποδηλώνει την αύξηση της δυσκαμψίας άρα και την ενίσχυση του χαλαρού υπεδάφους.

Η φασματική ανάλυση επιφανειακών κυμάτων (SASW) αποτελεί προάγγελο και παραλλαγή της MASW. Η μέθοδος SASW χρησιμοποιεί τα χαρακτηριστικά της διασποράς των επιφανειακών κυμάτων για τον προσδιορισμό της διακύμανσης της ταχύτητας των κυμάτων αυτών, σε συνάρτηση με το βάθος. Κατά τη μέθοδο αυτή γίνεται χρήση δύο δεκτών τοποθετούμενων στην επιφάνεια της Γης και ενός σφυριού ως σεισμική πηγή (PCTE, 2004).

Οι εφαρμογές της μεθόδου SASW είναι (PCTE, 2004) :

- Ο καθορισμός του προφίλ ενός οδοστρώματος καθώς επίσης και των υλικών του υποβάθρου του.

- Ο προσδιορισμός του προφίλ του εδάφους και της σεισμικής ταχύτητάς του, που απαιτείται για την ανάλυση σεισμού αλλά και δυναμικής φόρτισης.
- Ο προσδιορισμός του βάθους στηρίγματος γεφυρών.
- Οι εκτιμήσεις των επενδύσεων από σκυρόδεμα σε σήραγγες.

Η αναλογία φασμάτων οριζόντιας προς κατακόρυφη ταλάντωση των επιφανειακών κυμάτων (λόγος H/V) είναι μία μέθοδος ανάκτησης πληροφοριών για τις σεισμικές ιδιότητες του υπεδάφους κοντά στην επιφάνεια της Γης. Η απόκτηση δεδομένων πραγματοποιείται με μετρήσεις σε ένα σταθμό παρατήρησης ο οποίος λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια της Γης. Οι εφαρμογές της συγκεκριμένης μεθόδου βρίσκουν χρήση κυρίως στο τμήμα της σεισμικής έρευνας ως εργαλείο για γρήγορη ανίχνευση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σεισμικής ενίσχυσης όσον αφορά τη συχνότητα συντονισμού κυμάτων S καθώς επίσης και για τον καθορισμό των ελαστικών ιδιοτήτων της επιφανειακής γεωλογικής δομής (Lunedei & Malischewsky, 2015).

Η μέθοδος H/V απαιτεί τη χρήση δεκτών τριών συνιστωσών και εκτίμηση της αναλογίας του οριζόντιου και του κατακόρυφου φάσματος Fourier. Οι τελικές τιμές του οριζόντιου και του κατακόρυφου φάσματος Fourier προκύπτουν από το μέσο όρο των αντίστοιχων τιμών ενός επαρκούς δείγματος. Η αναλογία αυτή, η οποία είναι συνάρτηση της συχνότητας, ονομάζεται καμπύλη H/V (Lunedei & Malischewsky, 2015).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

3.1 ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

3.1.1 Κυματική Εξίσωση

Η κυματική εξίσωση πρώτης τάξης είναι μία γραμμική μερική διαφορική εξίσωση (ΜΔΕ), όπου το x αντιπροσωπεύει τον χώρο, το t τον χρόνο, το c είναι μία σταθερά η οποία πρέπει να διατηρείται θετική και τέλος το y αντιπροσωπεύει την διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

$$\frac{\partial y}{\partial t} + c \frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (3.1)$$

Η κυματική εξίσωση, δεύτερης τάξης είναι μία γραμμική μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει την διάδοση ταλαντώσεων υπό σταθερή ταχύτητα σε μία διεύθυνση (1D) γγ' (DeCross et al., 2019).

$$\frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (3.2)$$

όπου u η ταχύτητα διάδοσης του κύματος.

Η εξίσωση (3.2) δίνει μια καλή περιγραφή για ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων. Συνήθως, χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση μικρών ταλαντώσεων όπου η κίνηση

μπορεί να προσεγγιστεί από το νόμο του Hooke. Λύσεις της κυματικής εξίσωσης βρίσκουν εφαρμογή και σε άλλους κλάδους όπως ο ηλεκτρομαγνητισμός, η βαρυτική φυσική, η μεταφορά θερμότητας, η μελέτη διάδοσης των σεισμών κ.α. (DeCross et al., 2019).

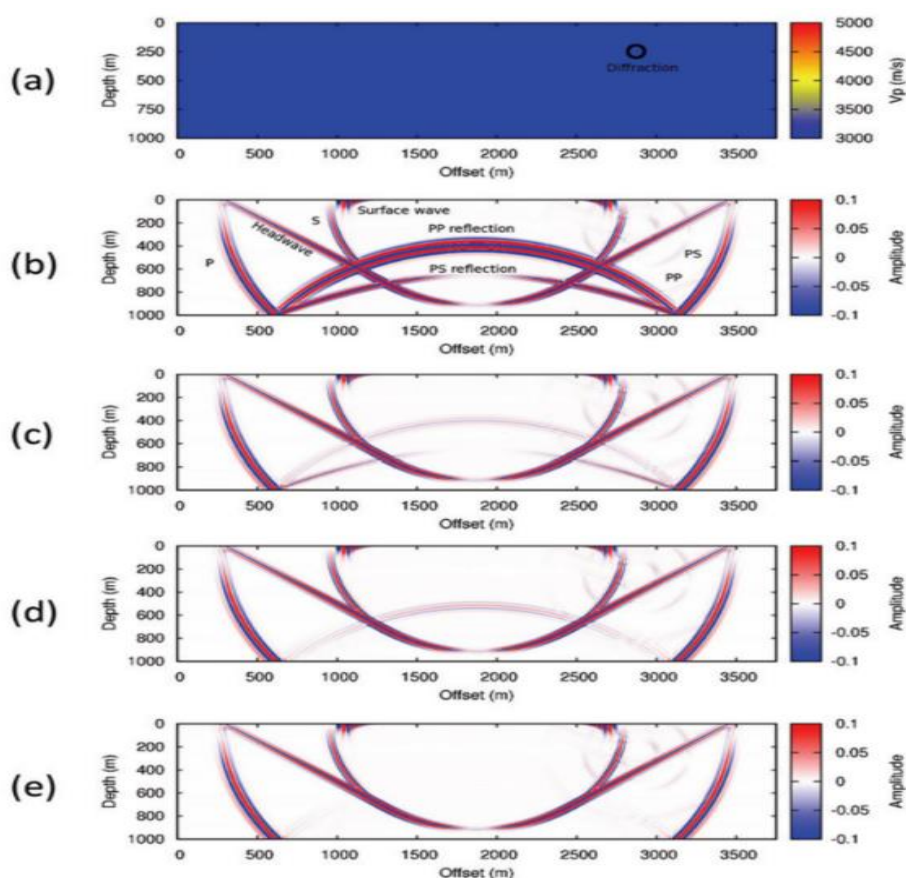
3.1.2 Αριθμητικές μέθοδοι προσομοίωσης της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων

Η ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων περιγραφής κυματικών εξισώσεων είναι μία κοινή συνιστώσα για πολλές σεισμικές εφαρμογές. Μέσω των αριθμητικών μεθόδων γίνεται κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο τα φυσικά συστήματα ενδιαφέροντος αντιδρούν στη διαδικασία ενός σεισμικού πειράματος (McDonald, 2012).

3.1.2.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite element method)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε καθώς παρατηρήθηκε ότι με την χρήση προγενέστερων μεθόδων δεν προκύπτουν σωστά αποτελέσματα προσομοιώσεων για σύνθετους γεωλογικούς σχηματισμούς. Όμως, η ανάγκη λεπτομερούς διακριτοποίησης του μέσου με σκοπό την αύξηση της ακρίβειας σε μεθόδους χαμηλής τάξης, τις καθιστά υπολογιστικά εξαιρετικά δαπανηρές (Virieux et al., 2011).

Βασική παράμετρος για την αποφυγή σεισμικών αντανάκλασεων στα όρια μελέτης που θα οδηγήσει σε τεχνητές (και ανεπιθύμητες) ανακλάσεις από τα όρια του, είναι η εφαρμογή απορροφητικών μέσων. Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων υφίστανται κυρίως 2 είδη απορροφητικών μηχανισμών. Ο πρώτος ονομάζεται οριακή συνθήκη “σπόγγου” (sponge boundary condition), ενώ ο δεύτερος “οριακές συνθήκες παραξιακών σεισμικών ακτίνων” (paraxial approximation boundary condition). Όμως, οι συγκεκριμένες μέθοδοι δεν διαθέτουν τα επιθυμητά αποτελέσματα απορρόφησης για κύματα με υψηλή γωνία πρόσπτωσης και για κύματα χαμηλής συχνότητας (Zhao, 2013). Για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων αναπτύχθηκε η μέθοδος των τέλειων αντιστοιχισμένων στρωμάτων (Perfectly matched layers). Η συγκεκριμένη μέθοδος μηδενίζει τις πιθανότητες δημιουργίας αντανάκλασεων σε περιπτώσεις υψηλής γωνίας πρόσπτωσης του κύματος καθώς επίσης είναι ανεξάρτητη της συχνότητας αυτού (Zhao, 2013).



Σχήμα 3.1: Μοντέλο (a) και στιγμιότυπα διάδοσης σεισμικού κύματος χωρίς (b) και με (c –e) απορροφητικά όρια (Zaiming, 2014).

Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται η ανάκλαση που υφίσταται ένα σεισμικό κύμα κατά την πρόσκρουση του στον πυθμένα του μοντέλου (b) χωρίς την ύπαρξη κάποιου απορροφητικού μέσου. Στην συνέχεια εφαρμόζεται απορροφητικό μέσο στα όρια του τμήματος μελέτης (c) όπου γίνεται αισθητή η μείωση της ισχύος του αντανακλώμενου κύματος. Στο Σχήμα 3.1 d, εφαρμόζεται μη αντανακλώμενο όριο, με συνέπεια το ποσοστό αντανάκλασης του κύματος να είναι ακόμα μικρότερο του από αυτό του (c). Τέλος, στο Σχήμα 3.1 e γίνεται συνδυασμένη εφαρμογή απορροφητικών και μη αντανακλώμενων ορίων, τα οποία εξαλείφουν την κυματική αντανάκλαση.

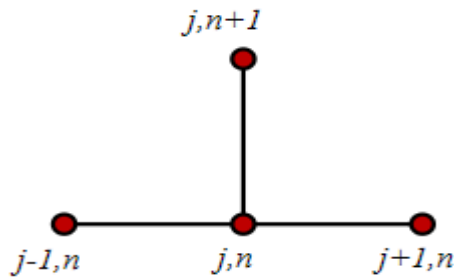
Στο ανώτατο όριο του μοντέλου η επιφάνεια δεν διαθέτει απορροφητικό μέσο και χαρακτηρίζεται ως ελεύθερη επιφάνεια. Το χαρακτηριστικό αυτό διευκολύνει την ακριβή μοντελοποίηση της διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων ακόμα και στην περίπτωση ύπαρξης σύνθετων οριακών συνθηκών (Virieux et al., 2011).

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων διαθέτει ένα μεγάλο εύρος επιλογών προσομοίωσης, συναρτήσει της πολυπλοκότητας του μοντέλου αλλά και της επιθυμητής ανάλυσης ενός συστήματος. Ομοίως, το επίπεδο της ακρίβειας, τόσο ως προς τον χρόνο αλλά και τον χώρο που απαιτείται, διαμορφώνεται με βάση το επίπεδο πολυπλοκότητας του προβλήματος. Μερικά από τα πλεονεκτήματα αυξημένης ακρίβειας της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων είναι ο βελτιωμένος σχεδιασμός, η καλύτερη εικόνα για κρίσιμες παραμέτρους, η αυξημένη ταχύτητα υπολογισμών, το μειωμένο κόστος λειτουργίας κ.α. ('Finite element method', 2001).

Σε πραγματικές συνθήκες, η διάδοση ενός κύματος πραγματοποιείται συνήθως και στις 3 διαστάσεις εντός ανομοιογενών υλικών. Οι συνήθεις μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών δεν συνιστώνται για τέτοιες περιπτώσεις καθώς το πλέγμα τους ορίζεται από ορθογώνια στοιχεία στο Καρτεσιανό σύστημα. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να ξεπεράσει το πρόβλημα αυτό εφόσον τα στοιχεία διακριτοποίησης ακολουθούν καλύτερα τις επιφάνειες μελέτης. Η ακρίβεια όμως της μεθόδου αυτής μειώνεται ραγδαία όταν τα στοιχεία της είναι κακώς διαμορφωμένα και κακώς ευθυγραμμισμένα με την γεωμετρία του συστήματος μελέτης (Geevers, 2018).

3.1.2.2 Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Finite differences method)

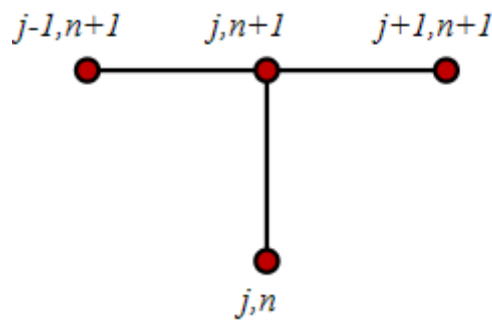
Οι ρητές (Explicit) και συνεπαγόμενες (Implicit) αναλύσεις στην μέθοδο πεπερασμένων διαφορών διακρίνονται ως εξής: Η ρητή ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κυματικού πεδίου ενός συγκεκριμένου σημείου μελέτης συναρτήσει του χώρου (J) και του χρόνου (n), με την χρήση ενός συνόλου σημείων όπου το κυματικό πεδίο είναι γνωστό, προηγούμενου χρόνου μελέτης (Σχήμα 3.2) (Σκαρλατούδης, 2009).



Σχήμα 3.2: Γραφική αναπαράσταση της ρητής μεθόδου πεπερασμένων διαφορών ('Finite difference method', 2006).

Αντίθετα, η συνεπαγόμενη ανάλυση βρίσκει λύσεις για όλα τα σημεία μελέτης του χώρου σε μελλοντική χρονική στιγμή. Ο υπολογισμός προκύπτει από τα δεδομένα ενός συγκεκριμένου σημείου σε προγενέστερο χρόνο (Σχήμα 3.3) (Σκαρλατούδης, 2009).

Η τελευταία μέθοδος χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος και καθίσταται δυσκολότερη στην εφαρμογή της (Harish, 2020).



Σχήμα 3.3: Γραφική αναπαράσταση της συνεπαγόμενης μεθόδου πεπερασμένων διαφορών ('Finite difference method', 2006).

Οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιούν τις λεγόμενες ομοιογενείς και ετερογενείς συνθέσεις για να λύσουν την εξίσωση της κίνησης. Στην πρώτη περίπτωση, η κίνηση σε κάθε ομοιογενή περιοχή περιγράφεται από την εξίσωση της κίνησης με σταθερές ακουστικές παραμέτρους. Για αυτήν την μέθοδο, οι οριακές συνθήκες σε όλες τις διεπιφάνειες πρέπει να ικανοποιούνται απόλυτα (Carcione, 2015). Στην περίπτωση της ετερογενούς σύνθεσης, οι οριακές συνθήκες ενσωματώνονται έμμεσα κατασκευάζοντας αναπαραστάσεις πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιώντας την εξίσωση κίνησης για ετερογενή μέσα (Carcione, 2015). Η ομοιογενή σύνθεση έχει περιορισμένη χρήση. Βέλτιστα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για απλές γεωμετρίες. Αντίθετα, η ετερογενής σύνθεση

καθιστά δυνατή την εκχώρηση διαφορετικών σεισμικών παραμέτρων για κάθε σημείο ενός πλέγματος, παρέχοντας έτσι την δυνατότητα δημιουργίας προσομοιωτών ποικίλων και πολύπλοκων μοντέλων (Carcione, 2015).

Γενικά, τα εναλλασσόμενα (staggered) πλέγματα χρησιμοποιούνται σε ετερογενείς συνθέσεις με σκοπό την απόκτηση σταθερών σχημάτων για διάφορες παραλλαγές του λόγου Poisson (Carcione, 2015). Επίσης, μειώνει το κόστος υπολογισμού καθώς ο υπολογισμός όλων των μεταβλητών των κόμβων δεν είναι αναγκαίος (Neil and Hashemi, 2018). Η μέθοδος εναλλαγής (staggered) διαιρεί αποτελεσματικά το πλέγμα στο μισό, αυξάνοντας έτσι την ακρίβεια της προσέγγισης (Carnione, 2015).

Από την άλλη μεριά το κανονικό (collocated) πλέγμα εφαρμόζεται με μεγάλη επιτυχία σε καμπυλόγραμμους σχηματισμούς προβλημάτων με σύνθετη γεωμετρία. Ωστόσο, σε σύγκριση με το εναλλασσόμενο πλέγμα, το κανονικό πλέγμα έχει 2 μειονεκτήματα. Έχει μεγαλύτερο συντελεστή σφάλματος περικοπής (truncation error coefficient) και αποσύνδεση των μονών από τους ζυγούς κόμβους (odd – even decoupling mode). Για να ξεπερασθεί το μεγάλο σφάλμα περικοπής μπορούν να χρησιμοποιηθούν αριθμητικά σχήματα υψηλότερης τάξης ή υψηλότερης ακρίβειας, όπως συμπαγή σχήματα (compact schemes). Η αποφυγή της αποσύνδεσης, των μονών από τους ζυγούς κόμβους η οποία προκαλεί αστάθεια στην μέθοδο που εφαρμόζεται, επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης μίας εγγενούς εξάλειψης (inherent dissipation, artificial damping) με την χρήση συμμετρικών και αντισυμμετρικών διαφορών (Zhang et al., 2012).

3.1.2.3 Ψευδοφασματική μέθοδος (Pseudo spectral method)

Η ψευδοφασματική μέθοδος (PSM) είναι μία αριθμητική μέθοδος υψηλής ακρίβειας, η οποία βρίσκει εφαρμογή σε μεθόδους προσομοίωσης διάδοσης κύματος εντός ετερογενούς μέσου δύο και τριών διαστάσεων (Furumura, 1998).

Η συγκεκριμένη μέθοδος (PSM) ορίζεται ως μια εναλλακτική τεχνική αριθμητικής προσομοίωσης των κλασικών μεθόδων πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων. Η ψευδοφασματική μέθοδος χρησιμοποιεί τον γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT) για τον υπολογισμό των χωρικών παραγώγων, προσφέροντας έτσι υψηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα έχουν υψηλή ακρίβεια ακόμη κι αν χρησιμοποιούνται

μεγάλα διαστήματα πλέγματος στο μοντέλο προσομοίωσης, συγκριτικά πάντα με τις διατάξεις χαμηλής τάξης στις πεπερασμένες διαφορές. Καταλήγοντας, η ψευδοφασματική μέθοδος είναι κατάλληλη για μοντελοποίηση μεγάλης κλίμακας διάδοσης σεισμικών κυμάτων, ειδικά για προβλήματα τριών διαστάσεων (Furumura, 1998).

3.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ SW4

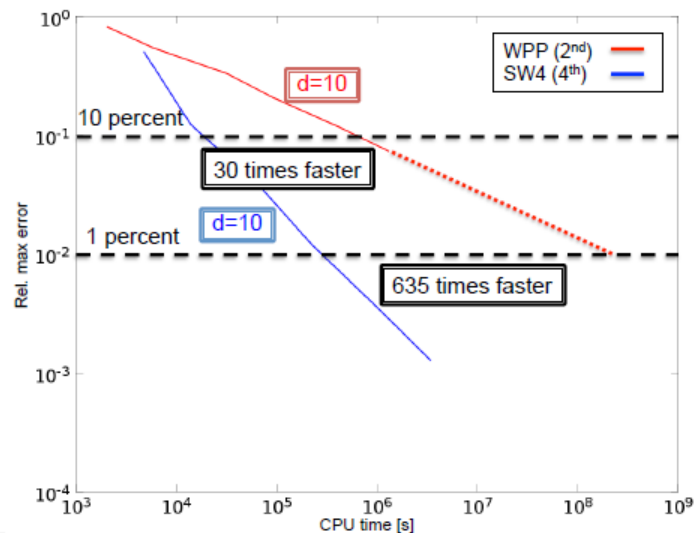
Οι αλγόριθμοι SW4 κατασκευάστηκαν για την προσομοίωση της διάδοσης σεισμών, δημιουργώντας επίγεια κίνηση. Η υλοποίηση της προσομοίωσης αυτής ολοκληρώνεται με την χρήση παράλληλων υπολογισμών. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 2.0 (Petersson & Sjogreen, 2016), (Sjogreen & Petersson, 2012), (Petersson & Sjogreen, 2012), (Petersson & Sjogreen, 2014), (Petersson, N.A.; Sjogreen, B. (2015).

Το μαθηματικό μοντέλο της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων στους συγκεκριμένους αλγόριθμους, περιγράφεται μέσω της εξίσωσης Navier στις 3 διαστάσεις ως εξής:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla * \mathbf{T} + \mathbf{f} \quad (3.3)$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα, $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ είναι το διάνυσμα μετατόπισης, \mathbf{T} ο τανυστής τάσης και $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$ μία συνάρτηση δύναμης που περιγράφει την σεισμική πηγή.

Οι αλγόριθμοι SW4 χρησιμοποιούν προσεγγίσεις χωρικών και χρονικών παραγώγων τέταρτης τάξης, ρητής (explicit) μεθόδου, καθώς υπολογίζεται η κατάσταση ενός δεδομένου συστήματος σε μελλοντικό χρόνο. Η προσέγγιση τέταρτης τάξης υποδηλώνει αυξημένη ακρίβεια. Χαρακτηριστικό γνώρισμα μίας αριθμητικής μεθόδου είναι το σφάλμα στη φάση. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάξη, τόσο μικρότερος είναι ο ρυθμός μεταβολής του σφάλματος στη φάση. Συνεπάγεται πως η χρήση προσεγγίσεων χωρικών και των χρονικών παραγώγων τέταρτης τάξης (SW4) συγκρατεί το αποτέλεσμα σταθερό για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα έναντι αντίστοιχων μεθόδων δεύτερης τάξης. Διατηρώντας το σφάλμα φάσης σε χαμηλό επίπεδο η πρόβλεψη του χρόνου άφιξης των κυμάτων γίνεται ακριβέστερη. Στο σχήμα 3.4 απεικονίζεται η σύγκριση των σχετικών μεγίστων απόλυτων σφαλμάτων από το SW4 (4th) και το WPP (2th) που αποτελεί προγενέστερη έκδοση των αλγόριθμων SW4 με ακρίβεια 2^{ης} τάξης, για απόσταση $d = 10$ Km από την πηγή (Petersson & Sjogreen, 2016).



Σχήμα 3.4: Σύγκριση μεθόδου WPP 2^{ης} τάξης με SW4 4^{ης} τάξης (Petersson & Sjogreen, 2016).

Παρατηρείται πως η μέθοδος 4^{ης} τάξης είναι πιο γρήγορη από την μέθοδο 2^{ης} τάξης στα αντίστοιχα σφάλματα μελέτης.

Η υλοποίηση των προσομοιώσεων αυτών πραγματοποιείται μέσω του προγραμματιστικού κώδικα C++ καθώς και της Fortran. Εκτός από καρτεσιανές συντεταγμένες υπάρχει η δυνατότητα χρήσης σφαιρικών συντεταγμένων, μέσω των οποίων δημιουργείται πιο ρεαλιστική προσομοίωση της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων σε πολύ μεγάλες περιοχές μελέτης. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την προσομοίωση της διάδοσης δονήσεων από σεισμούς σε μεγάλες αποστάσεις από την εστία του σεισμού. Για την αποφυγή τεχνητών ανακλάσεων από τα όρια του μοντέλου χρησιμοποιούνται απορροφητικά όρια (Petersson & Sjogreen, 2016).

Η SW4 χρησιμοποιεί ζώνες απορροφητικών ορίων (super – grid) στρώματα με σκοπό την καταστολή των τεχνητών αντανακλάσεων από τα όρια του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, το super – grid επιβραδύνει και συμπιέζει τα σεισμικά κύματα, αποσβένει τους τρόπους διάδοσης (modes) ανώτερης τάξης που δεν είναι δυνατό να διακριτοποιηθούν στο χωρικό πλέγμα του μοντέλου και διατηρεί τη σταθερότητα της προσομοίωσης εάν η ζώνη είναι αρκετά ευρεία. Υφίσταται η συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την δημιουργία επιφανειακών κυμάτων (Petersson & Sjogreen, 2016).

3.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ PSV-SYNTHETICS

Η μελέτη της P-SV μεθόδου εφαρμόζεται στο εδαφικό τμήμα της Γης με συνιστώσες μελέτης την x και z (2 διαστάσεις), ενώ η συνιστώσα y παραμένει πάντα μηδενική. Η ακρίβεια του εν λόγω σχήματος είναι 4^{ης} τάξης ως προς το χώρο και 2^{ης} τάξης ως προς τον χρόνο. Ο υπολογισμός των ελαστικών παραμέτρων ενός εδαφικού μοντέλου για συντεταγμένες (x,y) απαιτεί την ταυτόχρονη επίλυση δύο διαφορετικών διαφορικών εξισώσεων δεύτερης τάξης. Οι εξισώσεις είναι οι ακόλουθες (Vafidis, 1988):

$$\begin{aligned} \rho(x,z) \frac{\partial^2 u(x,z,t)}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda(x,z) + 2\mu(x,z)) \frac{\partial u(x,z,t)}{\partial x} + \lambda(x,z) \frac{\partial w(x,z,t)}{\partial z} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu(x,z) \frac{\partial w(x,z,t)}{\partial x} + \mu(x,z) \frac{\partial u(x,z,t)}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

και

$$\begin{aligned} \rho(x,z) \frac{\partial^2 w(x,z,t)}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial z} \left((\lambda(x,z) + 2\mu(x,z)) \frac{\partial w(x,z,t)}{\partial z} + \lambda(x,z) \frac{\partial u(x,z,t)}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu(x,z) \frac{\partial u(x,z,t)}{\partial z} + \mu(x,z) \frac{\partial w(x,z,t)}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Όπου $u(x,z,t)$ και $w(x,z,t)$ είναι οι μετατοπίσεις στις διευθύνσεις x και z αντίστοιχα, $\mu(x,z)$ και $\lambda(x,z)$ είναι οι παράμετροι Lamé, $\rho(x,z)$ η πυκνότητα και το ∂ συμβολίζει την μερική παράγωγο (Vafidis, 1988).

Αντί της επίλυσης του συστήματος διαφορικών εξισώσεων 2^{ης} τάξης, το ισοδύναμο σύστημα πρώτης τάξης λύνεται αριθμητικά. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τις βασικές εξισώσεις κίνησης σε διευθύνσεις x και z .

$$\rho(x,z) \partial_t u(x,z,t) = \partial_x \sigma_{xx}(x,z,t) + \partial_z \sigma_{xz}(x,z,t) \quad (3.6)$$

$$\rho(x, z) \partial_t w(x, z, t) = \partial_x \sigma_{xz}(x, z, t) + \partial_z \sigma_{zz}(x, z, t) \quad (3.7)$$

Οι σχέσεις τάσης – παραμόρφωσης έπειτα από την πρώτη παράγωγο ως προς το χρόνο γίνονται.

$$\partial_t \sigma_{xx}(x, z, t) = (\lambda(x, z) + 2\mu(x, z)) \partial_x \dot{u}(x, z, t) + \lambda(x, z) \partial_z \dot{w}(x, z, t) \quad (3.8)$$

$$\partial_t \sigma_{xz}(x, z, t) = \mu(x, z) \partial_x \dot{w}(x, z, t) + \mu(x, z) \partial_z \dot{u}(x, z, t) \quad (3.9)$$

$$\partial_t \sigma_{zz}(x, z, t) = \lambda(x, z) \partial_x \dot{u}(x, z, t) + (\lambda(x, z) + 2\mu(x, z)) \partial_z \dot{w}(x, z, t) \quad (3.10)$$

Όπου σ_{xx} , σ_{xz} , σ_{zz} , δηλώνουν τάσεις και οι τελείες πάνω από u και w υποδηλώνουν παραγώγους χρόνου.

Οι εξισώσεις (3.6, 3.7) και (3.8, 3.9, 3.10) μπορούν να παρουσιαστούν με την ακόλουθη μορφή:

$$\partial_t \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \rho^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \rho^{-1} \\ \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \partial_x \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \rho^{-1} \\ 0 & 0 & 0 & \rho^{-1} & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \partial_z \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \sigma_{xx} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix}$$

$$\dot{h} \quad \partial_t \mathbf{U} = \mathbf{A} \partial_x \mathbf{U} + \mathbf{B} \partial_z \mathbf{U} \quad (3.11)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Περιγραφή μοντέλων προσομοίωσης

Στην ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μέθοδοι και τα αποτελέσματα των προσομοιωτών διάδοσης επιφανειακών κυμάτων που μελετήθηκαν. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος PSV-SYNTHETICS για δισδιάστατη προσομοίωση της διάδοσης σεισμικού κύματος και η μέθοδος SW4 για τρισδιάστατη. Η εφαρμογή των αλγόριθμων PSV-SYNTHETICS υλοποιήθηκε εξ ολοκλήρου μέσω του λογισμικού Matlab ενώ η εφαρμογή του SW4, μέσω αλγόριθμων σε C++, Fortran και Matlab για την δημιουργία και επεξεργασία δεδομένων, αντίστοιχα. Έπειτα από την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, τα δεδομένα που προκύπτουν τροποποιούνται καταλλήλως σε αρχεία SGY. Η μετατροπή αυτή είναι απαραίτητη για την μελέτη και την δημιουργία αποτελεσμάτων με την χρήση της εφαρμογής kriSIS. Τέλος, μέσω του λογισμικού Matlab, χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή kriSIS v1.64 (Κρητικάκης, 2010) με σκοπό την δημιουργία των καμπυλών διασποράς, αλλά και την απεικόνιση και αποθήκευση των παραχθέντων αποτελεσμάτων αντιστροφής.

Η μελέτη της διάδοσης επιφανειακών σεισμικών κυμάτων υλοποιήθηκε σε δύο κατηγορίες μοντέλων. Η πρώτη κατηγορία αφορά μοντέλα ομοιογενούς ημιχώρου ενώ η δεύτερη, αφορά μοντέλα οριζόντιων στρωματωμένων μέσων. Στην πρώτη κατηγορία δημιουργήθηκε ένα μοντέλο, ενώ στην δεύτερη τέσσερα. Από τα παραπάνω μοντέλα, μέσω των μεθόδων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, υπολογίστηκαν οι καμπύλες διασποράς των επιφανειακών κυμάτων και στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα σφάλματα από την εκάστοτε αναλυτική λύση.

Βασική προϋπόθεση για την δημιουργία επιφανειακών κυμάτων Rayleigh είναι ο μηδενισμός των τάσεων σ_{xz} και σ_{zz} στην ελεύθερη επιφάνεια στις συνοριακές συνθήκες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων. Για έναν ομοιογενή ημιχώρο, η ταχύτητα διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh (V_R) είναι σταθερή για όλες τις συχνότητες σύμφωνα με την σχέση (Sheriff and Geldart, 1995):

$$V_R^6 - 8V_S^2V_R^4 + \left(24 - 16\frac{V_S^2}{V_P^2}\right)V_S^4V_R^2 + 16\left(\frac{V_S^2}{V_P^2} - 1\right)V_S^6 = 0 \quad (4.1)$$

Για $V_R = 0$ η εξίσωση 4.1 έχει αρνητικό αποτέλεσμα ενώ για $V_R = V_S$ θετικό. Έτσι, συνεπάγεται πως υπάρχει τουλάχιστον μία (πραγματική) τιμή της ταχύτητας V_R που ικανοποιεί την εξίσωση 4.1. Όταν ο λόγος των τετραγώνων των ταχυτήτων διάδοσης διαμήκων (V_P) και εγκάρσιων (V_S) ισούται με 3 (λόγος Poisson = 0.25), η ταχύτητα διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων (V_R) είναι ίση με το 0.9194 της ταχύτητας V_S .

Για την δημιουργία της αναλυτικής λύσης στρωματωμένων μέσων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Thomson – Haskell (Thomson, 1950, Haskell, 1953), σύμφωνα με την οποία “το κατακόρυφα ανομοιογενές μέσο προσομοιάζεται από αλληπάλληλα ομοιογενή οριζόντια στρώματα, υπερκείμενα ενός ημιχώρου” (Κρητικάκης, 2010).

Με βάση τα συνθετικά δεδομένα που δημιουργήθηκαν, προέκυψαν οι πειραματικές καμπύλες διασποράς μέσω της εφαρμογής του kriSIS. Οι αλγόριθμοι του kriSIS χρησιμοποιούν τον γραμμικό μετασχηματισμό στο χώρο του χρόνου συνάντησης – βραδύτητας ($\tau - p$) (McMechan and Yedlin, 1981). Η εφαρμογή kriSIS απεικονίζει τις καμπύλες διασποράς των επιφανειακών κυμάτων που καταγράφονται από διάταξη κοινής πηγής. Οι καμπύλες αυτές προκύπτουν έπειτα από τον μετασχηματισμό του κυματικού πεδίου από τον χώρο απόστασης – χρόνου ($x - t$) στον χώρο ταχύτητας φάσης – συχνότητας ($c - t$) (McMechan and Yedlin, 1981). Ο συγκεκριμένος μετασχηματισμός αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την απεικόνιση της μεταβολής της ταχύτητας φάσης των επιφανειακών κυμάτων, συναρτήσει της συχνότητας. Οι καμπύλες διασποράς των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh αντιστοιχούν σε τοπικά ενεργειακά μέγιστα της κυματικής ενέργειας στον χώρο ταχύτητας φάσης – συχνότητας (Κρητικάκης, 2010).

4.1.1 Μοντέλο ομοιογενούς ημιχώρου

Το μοντέλο ομοιογενούς ημιχώρου που δημιουργήθηκε (Καραμούτσος, 2020), ακολουθεί την ίδια γεωμετρία εξίσου για την PSV –SYNTHETICS και την SW4 μέθοδο. Οι πίνακες που ακολουθούν περιγράφουν την γεωμετρία αλλά και τις παραμέτρους των μοντέλων ομοιογενούς ημιχώρου που μελετήθηκαν.

Τα 2 μοντέλα ουσιαστικά δεν διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τα χαρακτηριστικά που τα περιγράφουν, εκτός μίας παραμέτρου. Η παράμετρος αυτή είναι η διάσταση του χωρίου

(Grid) το οποίο παίρνει τις τιμές 1 και 1.25 m. Στην ουσία οι κορυφές του πλέγματος καθορίζουν τις θέσεις που είναι δυνατό να τοποθετηθούν οι δέκτες. Θεωρητικά όσο μικρότερη είναι η διάσταση του χωρίου, τόσο καλύτερη αναμένεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

4.1.1.1 Παράμετροι μοντέλου αλγόριθμων PSV-SYNTHETICS

Ο πίνακας που ακολουθεί (Πίνακας 4.1) περιγράφει τη γεωμετρία και τις παραμέτρους των 2 ομοιογενών μοντέλων που δημιουργήθηκαν σε 2 διαστάσεις. Τα 2 μοντέλα διαθέτουν τα ίδια χαρακτηριστικά εκτός αυτό της διάστασης του χωρίου (Grid). Το πρώτο μοντέλο δημιουργήθηκε με Grid = 1 m. Ο συμβολισμός 1:1:640 υποδηλώνει πως ο πρώτος δέκτης τοποθετείται στη θέση κόμβου που αντιστοιχεί στο 1 m και έπειτα οι δέκτες αναπτύσσονται ανά 1 m έως τη θέση κόμβου που αντιστοιχεί στα 640 m. Παρόμοια για Grid = 1.25 m (δεύτερο μοντέλο) οι θέσεις των δεκτών ακολουθούν τον συμβολισμό 1.25:1.25:640. Το ελάχιστο μήκος κύματος υπολογίζεται ως $\frac{Vsmin}{f*2.5}$ όπου Vsmin η ελάχιστη ταχύτητα των S – κυμάτων και f η κεντρική συχνότητα της πηγής.

Η θέση της πηγής επιλέχθηκε να βρίσκεται στο μέσο της οριζόντιας διάστασης (X) του μοντέλου έτσι ώστε να είναι δυνατή η μελέτη των επιφανειακών κυμάτων που διαδίδονται εκατέρωθεν της πηγής.

Πίνακας 4.1: Παράμετροι του ομοιογενούς μοντέλου για την μέθοδο PSV-SYNTHETICS.

Ομοιογενές Μοντέλο	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2
Διαστάσεις (X , Z) (m)	640 , 320	640 , 320
V_p (m/s)	1732.0	1732.0
V_s (m/s)	1000.0	1000.0
ρ (g/cm ³)	2.000	2.000
Πλέγμα (m)	1	1.25
Κυματομορφή	Gaussian First Derivative	Gaussian First Derivative
Θέση πηγής (X , Z) (m)	(320 , 5)	(320 , 5)
Συχνότητα (Hz)	50	50
Θέσεις δεκτών (X , Z) (m)	1:1:640, 0	1.25:1.125:640 , 0
Διάστημα δειγματοληψίας (ms)	0.4	0.8
Χρόνος καταγραφής (ms)	380	380
Πλήθος κόμβων ($n_x/h+1$, $n_z/h+1$)	(641, 321) 205761	(513, 257) 131841
Κόμβοι ανά ελάχιστο μήκος κύματος ($\lambda_{min}/grid$)	8	6.4

Η χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της προσομοίωσης του ομοιογενούς μοντέλου με Grid = 1 m κατά την PSV – SYNTHETICS μέθοδο ήταν, 18 λεπτά και 42 δευτερόλεπτα, ενώ για Grid = 1.25 m ήταν, 16 λεπτά και 18 δευτερόλεπτα σε υπολογιστή με χαρακτηριστικά: AMD A10-5745M APU with Radeon(tm) HD Graphics 2.10 GHz και 12 GB μνήμη RAM.

4.1.1.2 Παράμετροι μοντέλου αλγόριθμων SW4

Ο πίνακας που ακολουθεί περιγράφει τη γεωμετρία και τις παραμέτρους των 2 ομοιογενών μοντέλων που δημιουργήθηκαν σύμφωνα με τον αλγόριθμο SW4. Τα 2 μοντέλα διαθέτουν τα ίδια χαρακτηριστικά εκτός αυτό του πλέγματος. Η διαφοροποίηση τους σε σχέση με τον αλγόριθμο PSV – SYNTHETICS είναι ο παράγοντας της τρίτης διάστασης. Η επιλογή της τιμής στην τρίτη διάσταση οφείλει να είναι ίση ή μεγαλύτερη με την τιμή του μεγίστου μήκους κύματος (λ_{max}) προκειμένου να μπορεί να καταγραφεί σωστά η ανάπτυξη του κύματος στην συγκεκριμένη διάσταση. Η θέση της πηγής στην τρίτη διάσταση βρίσκεται

στο μέσο της αντίστοιχης διάστασης του μοντέλου, ακολουθώντας έτσι το ίδιο μοτίβο με τις υπόλοιπες δύο διαστάσεις.

Πίνακας 4.2: Παράμετροι του ομοιογενούς μοντέλου κατά την μέθοδο SW4.

Ομοιογενές Μοντέλο	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2
Διαστάσεις (X ,Y, Z) (m)	640 , 70 , 320	640 , 70 , 320
V_p (m/s)	1732.0	1732.0
V_s (m/s)	1000.0	1000.0
ρ (g/cm ³)	2.000	2.000
Πλέγμα (m)	1	1.25
Κυματομορφή	Ricker Integral	Ricker Integral
Θέση πηγής (X ,Y, Z) (m)	320 , 35 , 0	320 , 35 , 0
Συχνότητα (Hz)	50	50
Θέσεις δεκτών (X ,Y, Z) (m)	30:1:610 , 35 , 0	37.5:1.25:602.5, 35, 0
Διάστημα δειγματοληψίας (ms)	0.5814	0.7267
Χρόνος καταγραφής (ms)	500	500
Πλήθος κόμβων ($n_x/h+1$, $n_y/h+1$, $n_z/h+1$)	641, 71, 321 (14609031)	513, 57, 257 (7514937)
Κόμβοι ανά ελάχιστο μήκος κύματος ($\lambda_{min}/grid$)	8	6.4

Η χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της προσομοίωσης του πρώτου ομοιογενούς μοντέλου κατά την SW4 μέθοδο ήταν, 1 ώρα και 03 λεπτά, ενώ για Grid = 1.25 m ήταν, 47 λεπτά και 41 δεύτερα σε υπολογιστή με χαρακτηριστικά: Intel Xeon CPU E5-2403 @ 1.80GHz και 8GB μνήμη RAM και παράλληλη επεξεργασία σε 4 (από τους 8) πυρήνες.

4.1.2 Μοντέλα οριζόντια στρωματωμένου μέσου

Συνολικά 4 μοντέλα οριζόντια στρωματωμένου μέσου δημιουργήθηκαν και επεξεργάστηκαν. Το εκάστοτε μοντέλο περιγράφεται από έναν πίνακα, όπου παρατίθενται οι ιδιότητες και τα πάχη των στρωμάτων και έναν δεύτερο, όπου περιγράφονται οι ιδιότητες

και η γεωμετρία του μέσου. Τα μοντέλα αυτά μελετήθηκαν στην διδακτορική διατριβή του κυρίου Κρητικάκη Γεώργιου (Κρητικάκης, 2010), αλλά και στη διεθνή βιβλιογραφία.

Πίνακας 4.3: Πάχος και ιδιότητες στρωμάτων πρώτου μοντέλου (Misieć, 1996).

Layer	Thickness (m)	V _p (m/s)	V _s (m/s)	Rho (g/cm ³)
1	3.00	2100.0	1200.0	1.200
2	2.00	1400.0	800.0	1.000
3	45.00	4000.0	2300.0	2.300

Πίνακας 4.4: Πάχος και ιδιότητες στρωμάτων δεύτερου μοντέλου (Luo et al., 2007).

Layer	Thickness (m)	V _p (m/s)	V _s (m/s)	Rho (g/cm ³)
1	2.40	650.0	194.0	1.820
2	2.40	750.0	270.0	1.860
3	2.40	1400.0	367.0	1.910
4	2.40	1800.0	485.0	1.960
5	3.60	2150.0	603.0	2.020
6	98.80	2800.0	740.0	2.090

Πίνακας 4.5: Πάχος και ιδιότητες στρωμάτων τρίτου μοντέλου (Roth and Holliger, 1999).

Layer	Thickness (m)	V _p (m/s)	V _s (m/s)	Rho (g/cm ³)
1	5.00	1100.0	330.0	1.600
2	67.00	1800.0	540.0	2.000

Πίνακας 4.6: Πάχος και ιδιότητες στρωμάτων τέταρτου μοντέλου (Tokimatsu et al., 1992).

Layer	Thickness (m)	V _p (m/s)	V _s (m/s)	Rho (g/cm ³)
1	2.00	300.0	180.0	1.800
2	4.00	1000.0	120.0	1.800
3	8.00	1400.0	180.0	1.800
4	80.00	1400.0	360.0	1.800

4.1.2.1 Παράμετροι μοντέλων αλγόριθμων PSV-SYNTHETICS

Ακολουθούν, πίνακες περιγραφής της γεωμετρίας και των ιδιοτήτων των τεσσάρων στρωματωμένων μοντέλων κατά την PSV – SYNTHETICS μέθοδο.

Στην περίπτωση των μοντέλων με τα στρωματωμένα μέσα, η θέση της πηγής επιλέχθηκε να βρίσκεται σε απόσταση τουλάχιστον ενός μέγιστου μήκους κύματος ($\lambda_{\max} = V_{r\max}/f$, όπου f η κεντρική συχνότητα της πηγής) από το αριστερό άκρο της οριζόντιας διάστασης (X) του μοντέλου. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να αποφευχθούν τυχόν παρεμβολές από τεχνητά ανακλώμενα κύματα που ενδεχομένως να δημιουργούνται από το πλησιέστερο άκρο του μοντέλου, λόγω αδυναμίας των ορίων απορρόφησης να αποσβέσουν πλήρως τα σεισμικά κύματα. Οι δέκτες τοποθετήθηκαν δεξιά της πηγής μέχρι το δεξιό όριο του μοντέλου.

Πίνακας 4.7: Γεωμετρία και ιδιότητες του πρώτου στρωματωμένου μοντέλου κατά την PSV-SYNTHETICS μέθοδο.

Στρωματωμένο Μοντέλο 1	PSV-SYNTHETICS
Διαστάσεις μοντέλου (X, Z) (m)	125 , 50
Πλέγμα (m)	0.25
Κυματομορφή	Gaussian First Derivative
Θέση πηγής (X, Z) (m)	25 , 0.75
Συχνότητα (Hz)	160
Θέσεις δεκτών (X, Z) (m)	25.5:0.5 :125 , 0
Διάστημα δειγματοληψίας (ms)	0.08
Χρόνος καταγραφής (ms)	200
Πλήθος κόμβων ($n_x/h+1, n_z/h+1$)	(501, 201) 100701
Κόμβοι ανά ελάχιστο μήκος κύματος ($\lambda_{\min}/\text{grid}$)	8

Η χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της προσομοίωσης του πρώτου στρωματωμένου μοντέλου κατά την PSV μέθοδο ήταν, 21 λεπτά και 20 δευτερόλεπτα σε υπολογιστή με χαρακτηριστικά: AMD A10-5745M APU with Radeon(tm) HD Graphics 2.10 GHz και 12 GB μνήμη RAM.

Πίνακας 4.8: Γεωμετρία και ιδιότητες του δεύτερου στρωματωμένου μοντέλου κατά την PSV-SYNTHETICS μέθοδο.

Στρωματωμένο Μοντέλο 2	PSV-SYNTHETICS
Διαστάσεις μοντέλου (X , Z) (m)	280 , 112
Πλέγμα (m)	0.25
Κυματομορφή	Gaussian First Derivative
Θέση πηγής (X , Z) (m)	56 , 0.75
Συχνότητα (Hz)	50
Θέσεις δεκτών (X , Z) (m)	56.5:0.5:280 , 0
Διάστημα δειγματοληψίας (ms)	0.1
Χρόνος καταγραφής (ms)	1500
Πλήθος κόμβων ($n_x/h+1$, $n_z/h+1$)	(1121, 449) 503329
Κόμβοι ανά ελάχιστο μήκος κύματος (λmin/grid)	6.21

Η χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της προσομοίωσης του δεύτερου στρωματωμένου μοντέλου κατά την PSV μέθοδο ήταν, 11 ώρες και 45 λεπτά σε υπολογιστή με χαρακτηριστικά: AMD A10-5745M APU with Radeon(tm) HD Graphics 2.10 GHz και 12 GB μνήμη RAM.

Πίνακας 4.9: Γεωμετρία και ιδιότητες του τρίτου στρωματωμένου μοντέλου κατά την PSV-SYNTHETICS μέθοδο.

Στρωματωμένο Μοντέλο 3	PSV-SYNTHETICS
Διαστάσεις μοντέλου (X , Z) (m)	180 , 72
Πλέγμα (m)	0.25
Κυματομορφή	Gaussian First Derivative
Θέση πηγής (X , Z) (m)	36 , 0.75
Συχνότητα (Hz)	50
Θέσεις δεκτών (X , Z) (m)	36.5:0.5:180 , 0
Διάστημα δειγματοληψίας (ms)	0.16
Χρόνος καταγραφής (ms)	1000
Πλήθος κόμβων ($n_x/h+1$, $n_z/h+1$)	(721, 289) 208369
Κόμβοι ανά ελάχιστο μήκος κύματος (λmin/grid)	10.56

Η χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της προσομοίωσης του τρίτου στρωματωμένου μοντέλου κατά την PSV μέθοδο ήταν, 1 ώρα και 55 λεπτά σε υπολογιστή με χαρακτηριστικά: AMD A10-5745M APU with Radeon(tm) HD Graphics 2.10 GHz και 12 GB μνήμη RAM.

Πίνακας 4.10: Γεωμετρία και ιδιότητες του τέταρτου στρωματωμένου μοντέλου κατά την PSV-SYNTHETICS μέθοδο.

Στρωματωμένο Μοντέλο 4	PSV-SYNTHETICS
Διαστάσεις μοντέλου (X , Z) (m)	235 , 94
Πλέγμα (m)	0.25
Κυματομορφή	Gaussian First Derivative
Θέση πηγής (X , Z) (m)	47 , 0.75
Συχνότητα (Hz)	30
Θέσεις δεκτών (X , Z) (m)	47.5:0.5:235 , 0
Διάστημα δειγματοληψίας (ms)	0.2
Χρόνος καταγραφής (ms)	2000
Πλήθος κόμβων ($n_x/h+1$, $n_z/h+1$)	(941, 377) 354757
Κόμβοι ανά ελάχιστο μήκος κύματος (λmin/grid)	6.4

Η χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της προσομοίωσης του τέταρτου στρωματωμένου μοντέλου κατά την PSV μέθοδο ήταν, 5 ώρες και 40 λεπτά σε υπολογιστή με χαρακτηριστικά: AMD A10-5745M APU with Radeon(tm) HD Graphics 2.10 GHz και 12 GB μνήμη RAM.

4.1.2.2 Παράμετροι μοντέλων αλγόριθμων SW4

Ακολουθούν, πίνακες περιγραφής της γεωμετρίας και των ιδιοτήτων των τεσσάρων στρωματωμένων μοντέλων κατά την SW4 μέθοδο. Η διαφορά της μεθόδου αυτής από την μέθοδο PSV – SYNTHETICS είναι ο παράγοντας της τρίτης διάστασης και το βάθος της πηγής ($Z = 0$ m).

Πίνακας 4.11: Γεωμετρία και ιδιότητες του πρώτου στρωματωμένου μοντέλου κατά την SW4 μέθοδο.

Στρωματωμένο Μοντέλο 1	SW4
Διαστάσεις μοντέλου (X ,Y, Z) (m)	125 , 25 , 50
Πλέγμα (m)	0.25
Κυματομορφή	Ricker
Θέση πηγής (X ,Y, Z) (m)	25 , 12.5 , 0
Συχνότητα (Hz)	160
Θέσεις δεκτών (X ,Y, Z) (m)	25.5:0.5:125 , 12.5 , 0
Διάστημα δειγματοληψίας (ms)	0.063
Χρόνος καταγραφής (ms)	200
Αριθμός κόμβων ($n_x/h+1$, $n_y/h+1$, $n_z/h+1$)	(501, 101, 201) 10170801
Κόμβοι ανά ελάχιστο μήκος κύματος ($\lambda_{min}/grid$)	8

Η χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της προσομοίωσης του πρώτου στρωματωμένου μοντέλου κατά την SW4 μέθοδο ήταν, 2 ώρες και 27 λεπτά σε υπολογιστή με χαρακτηριστικά: Intel Xeon CPU E5-2403 @ 1.80GHz και 8GB μνήμη RAM και παράλληλη επεξεργασία σε 4 (από τους 8) πυρήνες.

Πίνακας 4.12: Γεωμετρία και ιδιότητες του δεύτερου στρωματωμένου μοντέλου κατά την SW4 μέθοδο.

Στρωματωμένο Μοντέλο 2	SW4
Διαστάσεις μοντέλου (X ,Y, Z) (m)	200 , 50 , 56
Πλέγμα (m)	0.25
Κυματομορφή	Ricker
Θέση πηγής (X ,Y, Z) (m)	10 , 25,0
Συχνότητα (Hz)	50
Θέσεις δεκτών (X ,Y, Z) (m)	10.5:0.5:192.5 , 25 , 0
Διάστημα δειγματοληψίας (ms)	0.1087
Χρόνος καταγραφής (ms)	1500
Αριθμός κόμβων ($n_x/h+1$, $n_y/h+1$, $n_z/h+1$)	(801, 201, 225) 36225225
Κόμβοι ανά ελάχιστο μήκος κύματος ($\lambda_{min}/grid$)	6.21

Η χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της προσομοίωσης του δεύτερου στρωματωμένου μοντέλου κατά την SW4 μέθοδο ήταν, 36 ώρες και 53 λεπτά σε υπολογιστή με χαρακτηριστικά: Intel Xeon CPU E5-2403 @ 1.80GHz και 8GB μνήμη RAM και παράλληλη επεξεργασία σε 4 (από τους 8) πυρήνες.

Πίνακας 4.13: Γεωμετρία και ιδιότητες του τρίτου στρωματωμένου μοντέλου κατά την SW4 μέθοδο.

Στρωματωμένο Μοντέλο 3	SW4
Διαστάσεις μοντέλου (X ,Y, Z) (m)	225 , 36 , 72
Πλέγμα (m)	0.25
Κυματομορφή	Ricker
Θέση πηγής (X ,Y, Z) (m)	36 , 18 , 0
Συχνότητα (Hz)	50
Θέσεις δεκτών (X ,Y, Z) (m)	36.5:0.5:225 , 18 , 0
Διάστημα δειγματοληψίας (ms)	0.1662
Χρόνος καταγραφής (ms)	1000
Αριθμός κόμβων ($n_x/h+1$, $n_y/h+1$, $n_z/h+1$)	(901, 145, 289) 37756405
Κόμβοι ανά ελάχιστο μήκος κύματος ($\lambda_{min}/grid$)	10.56

Η χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της προσομοίωσης του τρίτου στρωματωμένου μοντέλου κατά την SW4 μέθοδο ήταν, 16 ώρες και 48 λεπτά σε υπολογιστή με χαρακτηριστικά: Intel Xeon CPU E5-2403 @ 1.80GHz και 8GB μνήμη RAM και παράλληλη επεξεργασία σε 4 (από τους 8) πυρήνες.

Πίνακας 4.14: Γεωμετρία και ιδιότητες του τέταρτου στρωματωμένου μοντέλου κατά την SW4 μέθοδο.

Στρωματωμένο Μοντέλο 4	SW4
Διαστάσεις μοντέλου (X ,Y, Z) (m)	235 , 50 , 50
Πλέγμα (m)	0.25
Κυματομορφή	Ricker
Θέση πηγής (X ,Y, Z) (m)	47 , 25 , 0
Συχνότητα (Hz)	50
Θέσεις δεκτών (X ,Y, Z) (m)	47.5:0.5:235 , 25 , 0
Διάστημα δειγματοληψίας (ms)	0.2182
Χρόνος καταγραφής (ms)	2000
Αριθμός κόμβων ($n_x/h+1$, $n_y/h+1$, $n_z/h+1$)	(941, 201, 201) 38017341
Κόμβοι ανά ελάχιστο μήκος κύματος (λmin/grid)	6.4

Η χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της προσομοίωσης του τέταρτου στρωματωμένου μοντέλου κατά την SW4 μέθοδο ήταν, 26 ώρες και 30 λεπτά σε υπολογιστή με χαρακτηριστικά: Intel Xeon CPU E5-2403 @ 1.80GHz και 8GB μνήμη RAM και παράλληλη επεξεργασία σε 4 (από τους 8) πυρήνες.

Στο παράρτημα Δ' παρατίθενται οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της προσομοίωσης με τους αλγόριθμους του SW4, καθώς επίσης και τα αντίστοιχα αρχεία εισόδου (*.in) τα οποία περιέχουν τις εντολές και τα χαρακτηριστικά κάθε μοντέλου.

4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης για το μοντέλο ομοιογενούς ημιχώρου

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, υλοποιήθηκε ένα εύρος διαφορετικών γεωμετρικών επιλογών ως προς την θέση σε σχέση με την πηγή και το πλήθος των δεκτών που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των καμπυλών διασποράς, με σκοπό την επιλογή των βέλτιστων αποτελεσμάτων μεταξύ αυτών. Αναλυτικότερα, με αφετηρία την κοινή γεωμετρία του ομοιογενούς ημιχώρου και τη κοινή θέση σεισμικής πηγής, δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικά μοντέλα ως προς το πλέγμα (Grid). Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο με Grid = 1 m και ένα δεύτερο με Grid = 1.25 m όπου αμφότερα, μοιράζονται τις διαφορετικές επιλογές θέσεων των γεωφώνων που μελετήθηκαν.

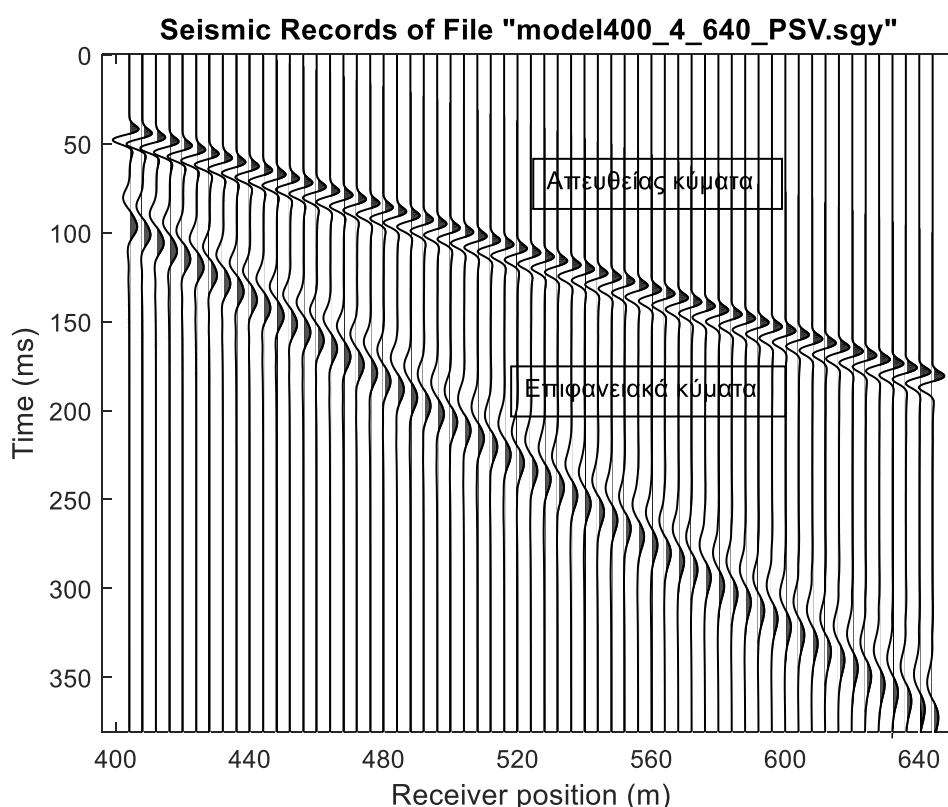
Συνολικά δημιουργήθηκαν 6 αρχεία SGY για κάθε περίπτωση (Grid = 1 m & Grid = 1.25 m) για την μέθοδο PSV – SYNTHETICS και 2 για την μέθοδο SW4.

Για την μέθοδο PSV – SYNTHETICS επιλέχθηκαν θέσεις γεωφώνων δεξιά και αριστερά της πηγής μέχρι το όριο του μοντέλου και με θέση κόμβων από 1 έως 240 m και από 400 έως 640 m. Λόγω του ομοιογενούς ημιχώρου και με την θέση της πηγής να βρίσκεται ακριβώς στην μέση της οριζόντιας διάστασης του μοντέλου (320 m), παρατηρήθηκε συμμετρία ως προς την διάδοση του σεισμικού κύματος. Το γεγονός αυτό είναι η αιτία της επιλογής μελέτης των καταγραφών από δέκτες τοποθετημένους μόνο δεξιά από την πηγή (πλήρης δεξιά κάλυψη γεωφώνων και γεωφωνα στις θέσεις κόμβων από 400 έως 640 m). Επίσης, μελετήθηκαν 2 περιπτώσεις σχετικά με την απόσταση πηγής δέκτη. Στην 1^η περίπτωση χρησιμοποιήθηκε απόσταση πηγής – γεωφώνου (offset) η οριζόντια απόσταση πηγής – γεωφώνου, ενώ στην δεύτερη περίπτωση υπολογίζεται η γεωμετρική αυτή απόσταση, λαμβάνοντας δηλαδή υπόψη και το βάθος της πηγής (5 m).

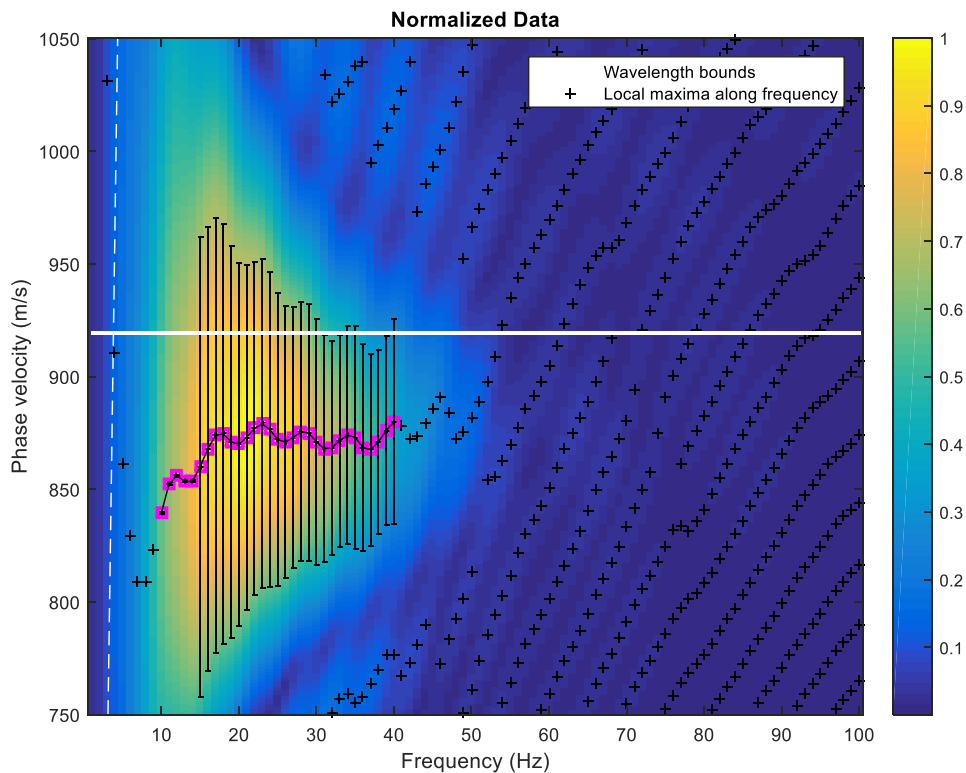
4.2.1 Αποτελέσματα αλγόριθμων PSV-SYNTHETICS

Ενδεικτικά, στην παρούσα παράγραφο παρατίθενται τα αποτελέσματα για μοντέλο ομοιογενούς ημιχώρου με $\text{Grid} = 1 \text{ m}$ και θέση δεκτών από 400 έως 640 κόμβους (Σχήμα 4.1). Τα υπόλοιπα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α'.

Ειδικότερα, στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η κατακόρυφη συνιστώσα από τις συνθετικές σεισμικές καταγραφές που προέκυψαν από τους αλγόριθμους του PSV – SYNTHETICS για τους δέκτες τοποθετημένους από 400 – 640 m και $\text{Grid} = 1 \text{ m}$. Αντίστοιχα στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται η κατανομή της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας στο πεδίο συχνότητα – ταχύτητας φάσης για τις καταγραφές του Σχήματος 4.1. Η ανάλυση στον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα του Σχήματος 4.2 είναι 1Hz και 0.5 m/s, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.1: Μοντέλο ομοιογενούς ημιχώρου: Συνθετικές σεισμικές καταγραφές που προέκυψαν από τους αλγόριθμους του PSV – SYNTHETICS για τους δέκτες τοποθετημένους από 400 – 640 m (απεικόνιση με βήμα 4 m) και $\text{Grid} = 1 \text{ m}$. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι θέσεις των δεκτών και στον κατακόρυφο ο χρόνος σε ms.



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης για τις καταγραφές του σχήματος 4.1. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|\cdot|$). Η λευκή οριζόντια γραμμή συμβολίζει την αναλυτική λύση σε ομοιογενές μέσο (919.4 m/s).

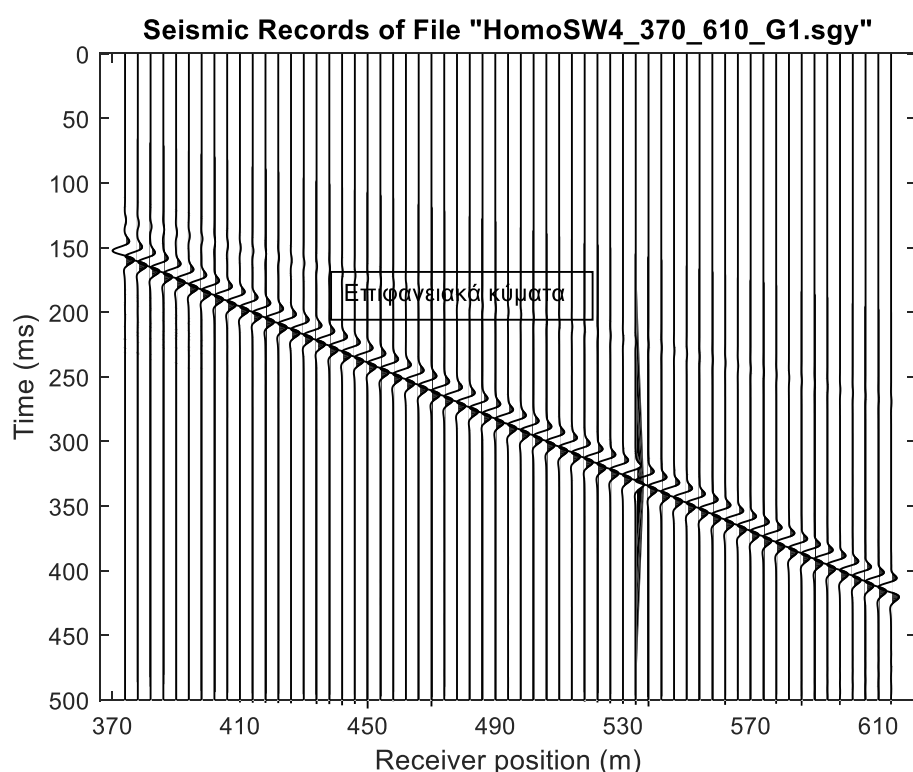
Στο Σχήμα 4.2 παρατηρείται ότι το συχνοτικό εύρος της σεισμικής ενέργειας κατανέμεται μεταξύ 10 και 40 Hz με κυρίαρχη συχνότητα τα 20 περίπου Hz, ενώ η κεντρική συχνότητα της πηγής είχε οριστεί αρχικά στα 50Hz. Παρατηρείται δηλαδή μια υποβάθμιση της κεντρικής συχνότητας της πηγής κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων που δημιουργούνται με τους αλγόριθμους του PSV – SYNTHETICS. Το φαινόμενο αυτό μελετάται σε επόμενη παράγραφο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, η καμπύλη διασποράς έχει ταχύτητα φάσης (τοπικά ενεργειακά μέγιστα) μεταξύ 839 και 880 m/s.

4.2.2 Αποτελέσματα αλγόριθμων SW4

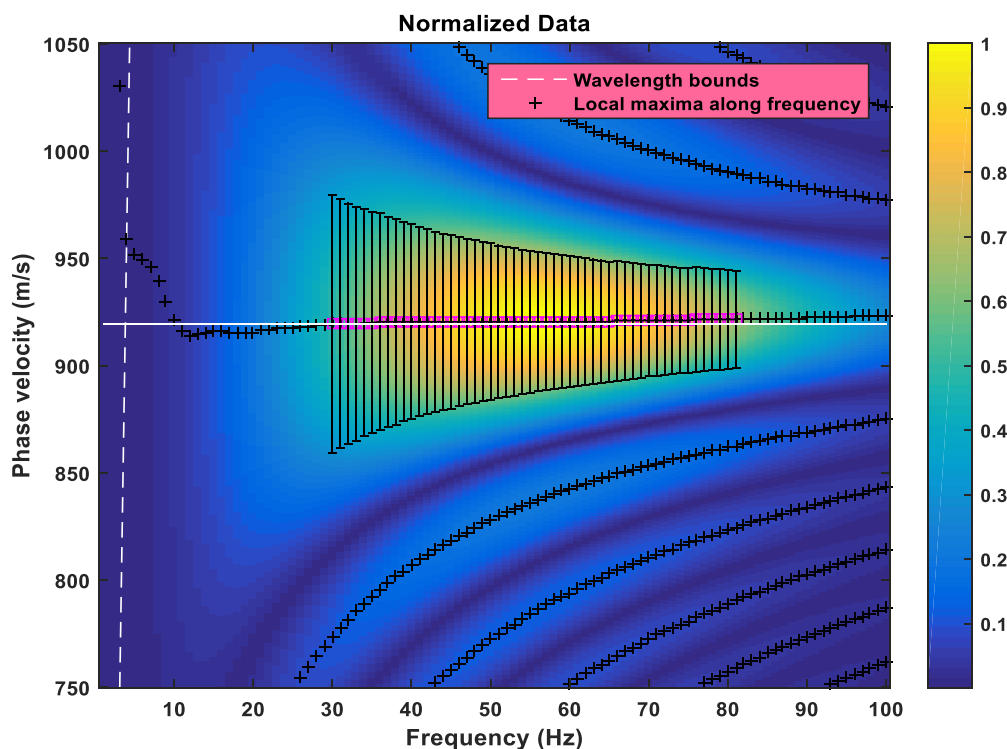
Η αντίστοιχη απεικόνιση των δεκτών με θέσεις κόμβων μεταξύ 400 και 640 m της PSV – SYNTHETICS μεθόδου είναι οι θέσεις κόμβων μεταξύ 370 και 610 m της SW4 μεθόδου. Τα υπόλοιπα αποτελέσματα παρατίθενται στο Παράρτημα Α'.

Ειδικότερα, στο Σχήμα 4.3 απεικονίζεται η κατακόρυφη συνιστώσα από τις συνθετικές σεισμικές καταγραφές που προέκυψαν από τους αλγόριθμους του SW4 για τους δέκτες τοποθετημένους από 370 – 610 m και Grid = 1 m. Αντίστοιχα στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται η κατανομή της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας στο πεδίο συχνότητας – ταχύτητας φάσης για τις καταγραφές του Σχήματος 4.3. Η ανάλυση στον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα του Σχήματος 4.4 είναι 1Hz και 0.5 m/s, αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 4.3 δεν πραγματοποιείται η εμφάνιση των απευθείας κυμάτων, καθώς η θέση της πηγής και των δεκτών βρίσκονται στο ίδιο βάθος (0 m), άρα η κατακόρυφη συνιστώσα των απευθείας κυμάτων αναμένεται να είναι μηδενική.



Σχήμα 4.3: Μοντέλο ομοιογενούς ημιχώρου: Συνθετικές σεισμικές καταγραφές που προέκυψαν από τους αλγόριθμους του PSV – SYNTHETICS για τους δέκτες τοποθετημένους από 370 – 610 m (απεικόνιση με βήμα 4 m) και Grid = 1 m. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι θέσεις των δεκτών και στον κατακόρυφο ο χρόνος σε ms.



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης για τις καταγραφές του σχήματος 4.3. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: |-|). Η λευκή οριζόντια γραμμή συμβολίζει την αναλυτική λύση σε ομοιογενές μέσο (919.4 m/s).

Στο Σχήμα 4.4 το συχνοτικό εύρος της σεισμικής ενέργειας κατανέμεται μεταξύ 30 και 80 Hz με κυρίαρχη συχνότητα τα 55 περίπου Hz, ενώ η ταχύτητα φάσης παρουσιάζει μικρή μεταβολή με τιμές μεταξύ 919.50 και 921.50 m/s.

4.2.3 Σύγκριση καμπύλων διασποράς με την αναλυτική λύση

Κατά την επεξεργασία των καταγραφών, δημιουργήθηκαν οι καμπύλες διασποράς για το εκάστοτε μοντέλο μελέτης. Η τελική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει από τη σύγκριση της αναλυτικής λύσης με τις καμπύλες διασποράς των συνθετικών καταγραφών και την εξαγωγή σφαλμάτων προσέγγισης.

Οι πίνακες 4.15 και 4.16 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα του μέσου απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος και της τυπικής απόκλισης μεταξύ της αναλυτικής και της

υπολογισμένης καμπύλης διασποράς των ομοιογενών μοντέλων με Grid 1 και 1.25 m. Στον πρώτο πίνακα (Πίνακας 4.15) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου SW4 με βέλτιστα αποτελέσματα στις θέσεις δεκτών από 321 έως 610 m και Grid με τιμή 1 m. Η μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων είναι 0.0776 % ενώ η τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων είναι 0.0550 %. Στον δεύτερο πίνακα (Πίνακας 4.15) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου PSV – SYNTHETICS με βέλτιστα αποτελέσματα στις θέσεις δεκτών από 400 έως 640 m και Grid με τιμή 1.25 m. Η μέση τιμή των απόλυτων σφαλμάτων είναι 4.8012 % ενώ η τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων είναι 1.3280 %.

Έπειτα από την επεξεργασία και την σύγκριση των αποτελεσμάτων, οι επικρατέστερες επιλογές με το μικρότερο σφάλμα από τη μέθοδο PSV – SYNTHETICS είναι οι συνθετικές καταγραφές με Grid = 1.25 m και θέσεις γεωφώνων από τα 400 έως τα 640 m ενώ από την μέθοδο SW4, με την χρήση Grid = 1 m, και πλήρης κάλυψη γεωφώνων δεξιά της πηγής (321 έως 610 m) (Πίνακας 4.15). Η διαφοροποίηση που παρατηρείται στη θέση των δεκτών μεταξύ των 2 μεθόδων προσομοίωσης οφείλεται στο γεγονός πως στην SW4 μέθοδο τα απορροφητικά όρια εφαρμόζονται στους 30 κόμβους εντός του σχηματισμού μελέτης. Αντίθετα, στην PSV –SYNTHETICS μέθοδο τα απορροφητικά όρια δρουν εκτός του σχηματισμού μελέτης. Τα σφάλματα των διορθωμένων ως προς την απόσταση πηγής – δέκτης δεδομένων, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα, είναι παρόμοια με τα αντίστοιχα μη διορθωμένα. Στην μέθοδο SW4 δημιουργήθηκαν 2 καταγραφές δεδομένων με θέσεις γεωφώνων στους κόμβους μεταξύ 370 και 602.5m καθώς και 321.5 έως 602.5 m. Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν χρήζει διόρθωσης καθώς η αρχική θέση της πηγής βρίσκεται στην επιφάνεια ($Z=0$ m) του μοντέλου μελέτης.

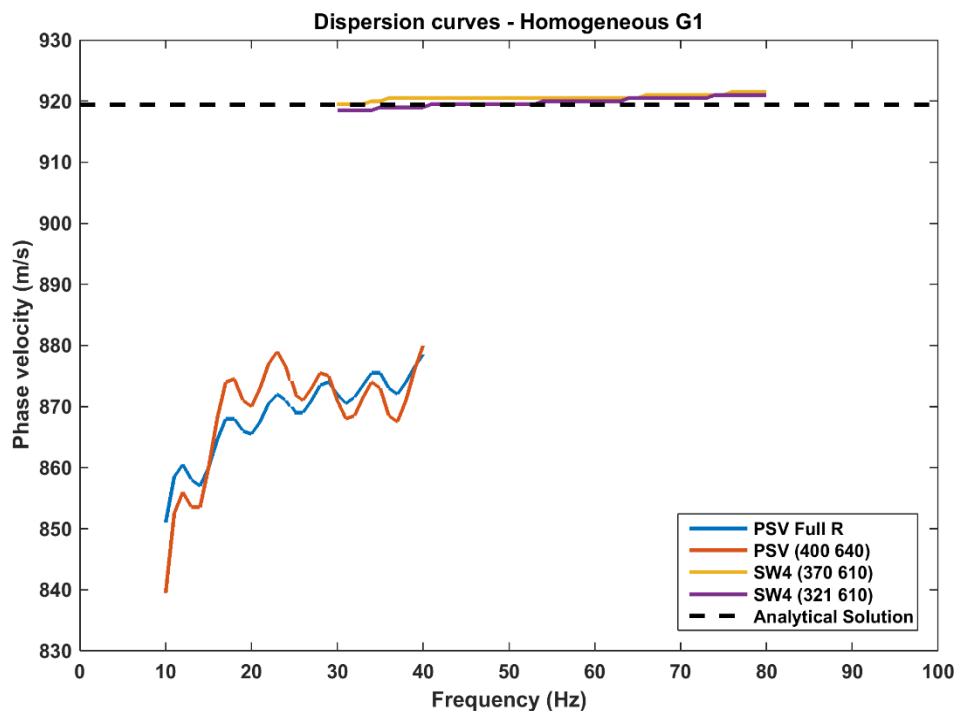
Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα οπτικής σύγκρισης των καμπυλών διασποράς μεταξύ των μεθόδων PSV – SYNTHETICS και SW4 του μοντέλου ομοιογενούς μέσου σύμφωνα με τις επιλογές της προηγούμενης παραγράφου. Στον οριζόντιο άξονα παρατίθεται η συχνότητα (Hz), ενώ στον κατακόρυφο η ταχύτητα φάσης (m/s). Στην μέθοδο PSV – SYNTHETICS οι καμπύλες διασποράς εκτείνονται μεταξύ των 10 και 40 Hz και 840 και 880 m/s ενώ κατά την μέθοδο SW4 οι καμπύλες διασποράς εκτείνονται μεταξύ των 30 και 80 Hz με ταχύτητα εξαιρετικά κοντά στην αναλυτική λύση (919.4 m/s). Το μέσο απόλυτο εκατοστιαίο σφάλμα για την μέθοδο PSV – SYNTHETICS των δύο επιλογών κυμαίνονται περί του 5.50 % και αντίστοιχα της μεθόδου SW4 περί του 0.10 %.

Πίνακας 4.15: Ομοιογενές μοντέλο: Υπολογισμός του μέσου απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος και της αντίστοιχης τυπικής απόκλισης μεταξύ της αναλυτικής και της υπολογισμένης από τα συνθετικά δεδομένα καμπύλης διασποράς για τις διάφορες θέσεις των δεκτών που μελετήθηκαν. Το πλέγμα (Grid) που χρησιμοποιήθηκε παίρνει τις τιμές 1 m και 1.25 m στις κορυφές του οποίου τοποθετήθηκαν οι δέκτες.

SW4			
Θέσεις δεκτών (m)	Grid (m)	Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)	Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)
370 – 602.5	1.25	0.1182	0.0838
321.5 – 602.5	1.25	0.1228	0.07964
370 – 610	1	0.1303	0.0522
321 – 610	1	0.0776	0.0550

Πίνακας 4.16: Ομοιογενές μοντέλο: Υπολογισμός του μέσου απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος και της αντίστοιχης τυπικής απόκλισης μεταξύ της αναλυτικής και της υπολογισμένης από τα συνθετικά δεδομένα καμπύλης διασποράς για τις διάφορες θέσεις των δεκτών που μελετήθηκαν. Το πλέγμα (Grid) που χρησιμοποιήθηκε παίρνει τις τιμές 1 m και 1.25 m στις κορυφές του οποίου τοποθετήθηκαν οι δέκτες. Τα διορθωμένα μοντέλα υποδηλώνουν πως η σεισμική πηγή ως προς τον κατακόρυφο άξονα βρίσκονται στην επιφάνεια του μοντέλου.

PSV – SYNTHETICS			
Θέσεις δεκτών (m)	Grid (m)	Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)	Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)
400 – 640	1.25	4.8012	1.3280
Πλήρης δεξιά κάλυψη από την πηγή	1.25	4.8748	0.9405
400 – 640	1	5.5011	0.9940
Πλήρης δεξιά κάλυψη από την πηγή	1	5.5239	0.7096
400 – 640 (Διορθωμένο)	1	5.5029	0.9948
Πλήρης δεξιά κάλυψη από την πηγή (Διορθωμένο)	1	6.4678	0.7028



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα οπτικής σύγκρισης υπολογισμένων καμπυλών διασποράς μεταξύ της μεθόδου PSV - SYNTHETICS και της μεθόδου SW4, για θέσεις γεωφώνων πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης [SW4 (321 610), (PSV (Full R))] και θέσεις γεωφώνων μεταξύ 400 και 640 m για την PSV - SYNTHETICS μέθοδο και αντίστοιχα μεταξύ των 370 με 610 m για την μέθοδο SW4. Και στις 2 περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε Grid 1 m.

Η διαφοροποίηση της τιμής του πλέγματος (Grid) μεταξύ της τιμής 1 και 1.25 m επιδρά στην αναλυτικότητα των αποτελεσμάτων. Όσο μικρότερη η τιμή της διάστασης του χωρίου τόσο μεγαλύτερη πυκνότητα που καταλαμβάνουν οι δέκτες. Συγκριτικά, όταν η διάσταση του χωρίου λάβει την τιμή του 1 m, εμφανίζει τυπική απόκλιση μικρότερη απ' ότι όταν λάβει την τιμή 1.25 m, ενώ η τιμή του ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος είναι ελάχιστα μεγαλύτερη.

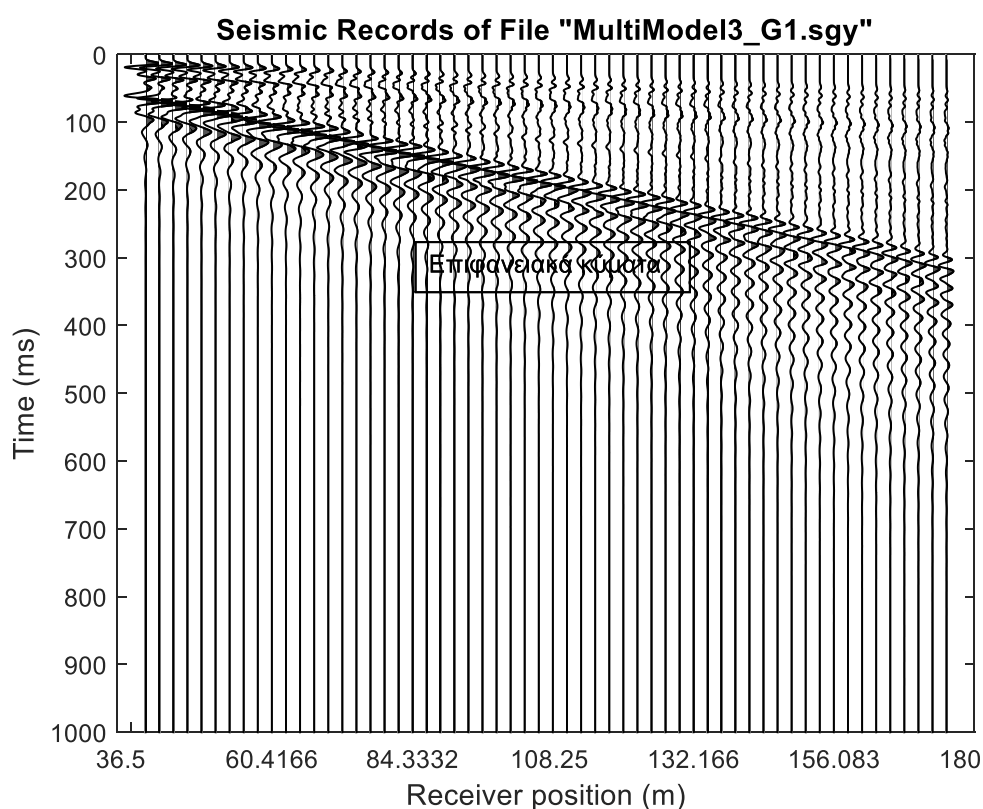
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ομοιογενούς ημιχώρου που παρουσιάζονται παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η μέθοδος με το ελάχιστο σφάλμα είναι η μέθοδος SW4. Η ολοκλήρωση της προσομοίωσης πραγματοποιείται με σφάλμα της τάξεως του 0.10 % περίπου, σε αντίθεση με την μέθοδο PSV – SYNTHETICS η οποία εμφανίζει σφάλμα τάξεως του 5.00 %. Επιπλέον, το συχνοτικό εύρος στην SW4 διατηρείται κοντά στην τιμή της αρχικής συχνότητας (50 HZ) ενώ αντίθετα, η μέθοδος PSV – SYNTHETICS παρουσιάζει συχνοτική υποβάθμιση στο μισό της αρχικής συχνότητας.

4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τα μοντέλα οριζόντια πολυστρωματικού μέσου.

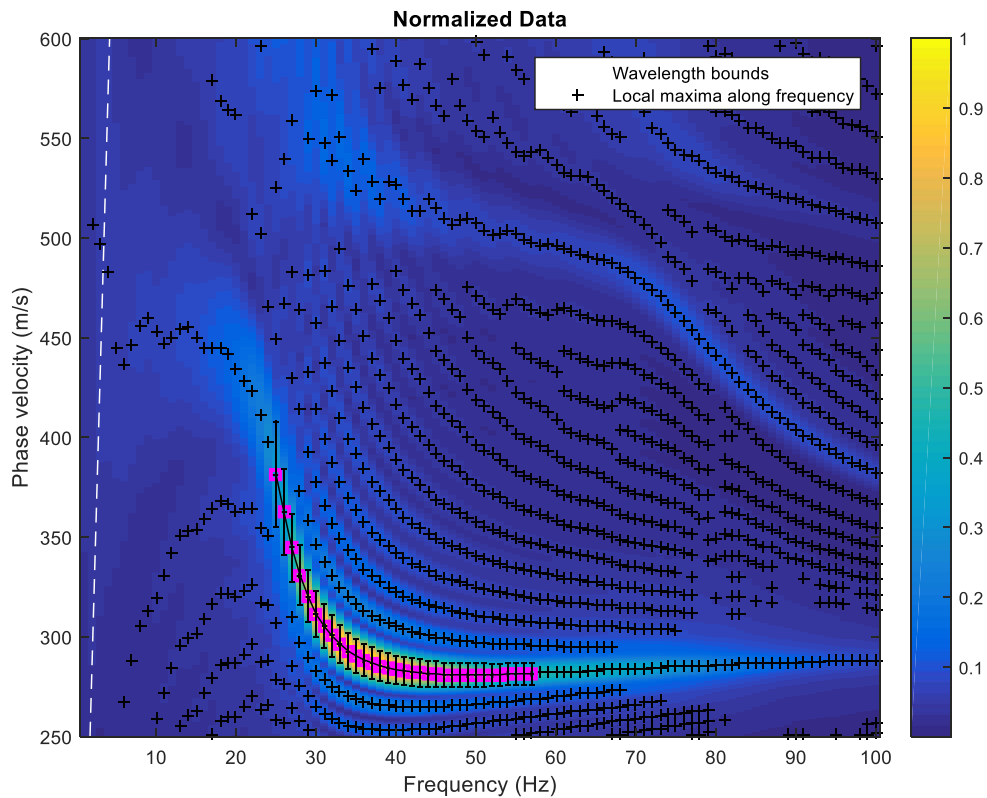
Συνολικά δημιουργήθηκαν 4 μοντέλα οριζόντια πολυστρωματικού μέσου, τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στους πίνακες 4.3 έως 4.14.

4.3.1 Αποτελέσματα αλγόριθμων PSV-SYNTHETICS

Ενδεικτικά παραθέτονται τα αποτελέσματα του τρίτου μοντέλου μελέτης. Ακολουθεί η καταγραφή κοινής πηγής και η αντίστοιχη εικόνα μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων μοντέλων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β'.



Σχήμα 4.6: Μοντέλο στρωματωμένου μέσου: Συνθετικές σεισμικές καταγραφές του τρίτου μοντέλου που προέκυψαν από τους αλγόριθμους του PSV – SYNTHETICS για τους δέκτες τοποθετημένους δεξιά της πηγής έως το τέλος του μοντέλου (απεικόνιση με βήμα 4 m) και Grid = 0.25 m. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι θέσεις των δεκτών και στον κατακόρυφο ο χρόνος σε ms.

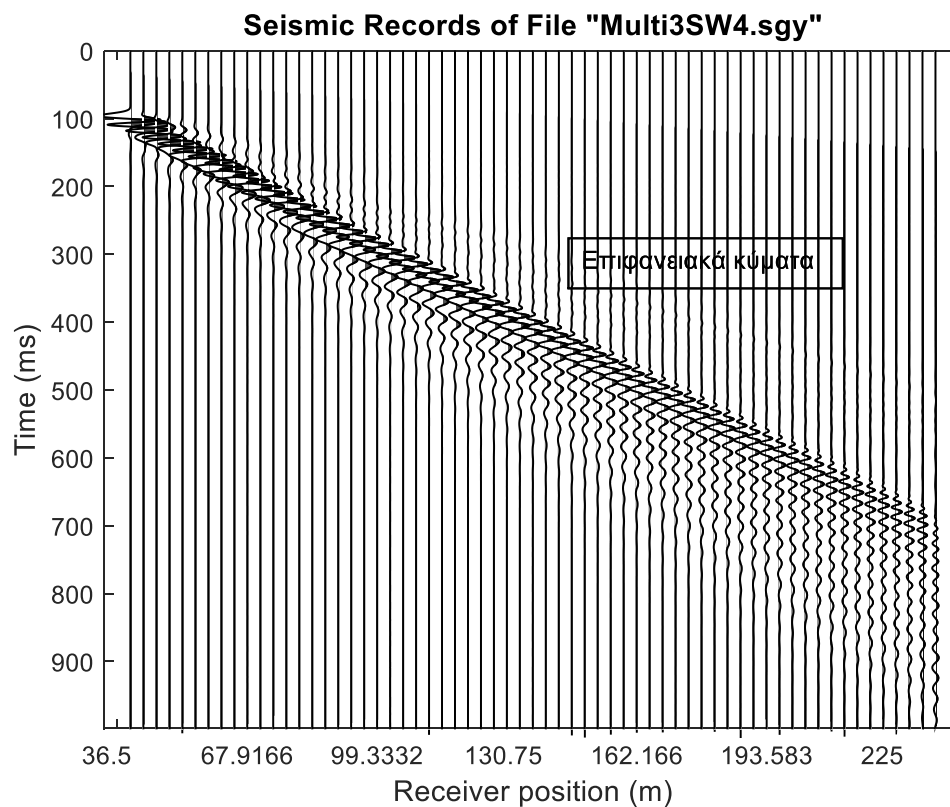


Σχήμα 4.7: Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης για τις καταγραφές του σχήματος 4.6. Η θεμελιώδης καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: |-|).

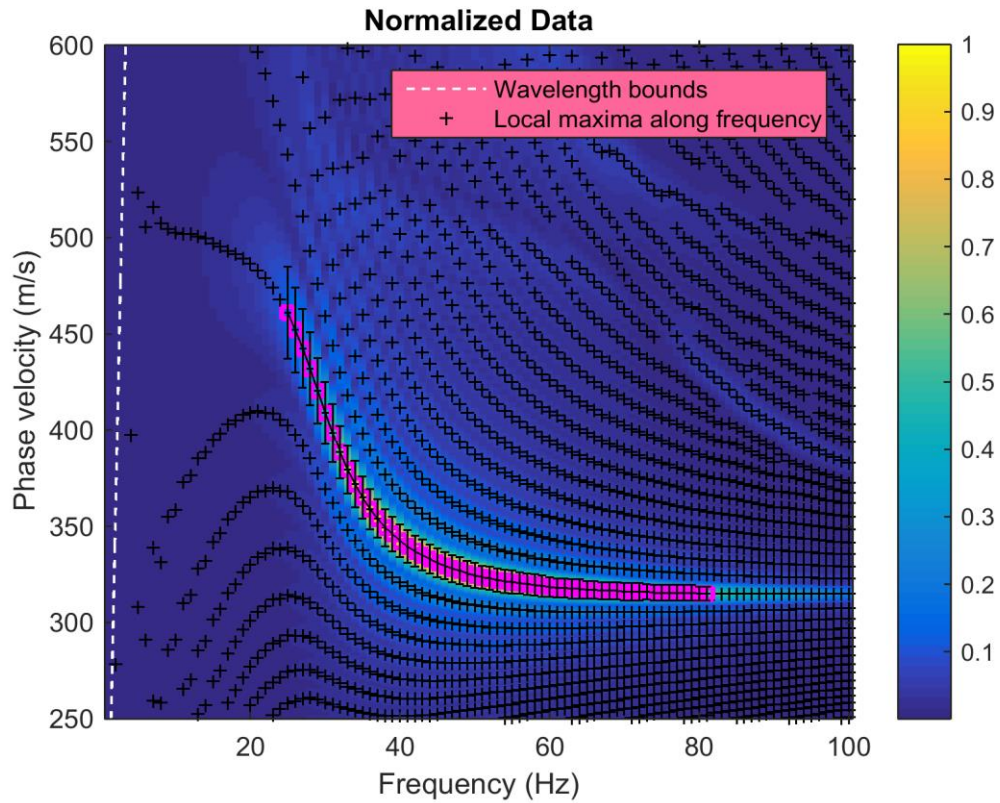
Στο Σχήμα 4.7 το συχνοτικό εύρος της σεισμικής ενέργειας κατανέμεται μεταξύ 25 και 57 Hz ενώ η ταχύτητα φάσης της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς παρουσιάζει μεταβολή με τιμές μεταξύ 286.0 και 381.5 m/s.

4.3.2 Αποτελέσματα αλγόριθμων SW4

Ενδεικτικά παραθέτονται τα αποτελέσματα του τρίτου μοντέλου μελέτης. Ακολουθεί η καταγραφή κοινής πηγής και η αντίστοιχη εικόνα μετασχηματισμού του κυματικού πεδίου. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων μοντέλων παρουσιάζονται στο παράρτημα Β'.



Σχήμα 4.8: Μοντέλο στρωματωμένου ημιχώρου: Συνθετικές σεισμικές καταγραφές του τρίτου μοντέλου που προέκυψαν από τους αλγόριθμους του SW4 για τους δέκτες τοποθετημένους δεξιά της πηγής έως το τέλος του μοντέλου και $\text{Grid} = 0.25 \text{ m}$. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι θέσεις των δεκτών και στον κατακόρυφο ο χρόνος σε ms.



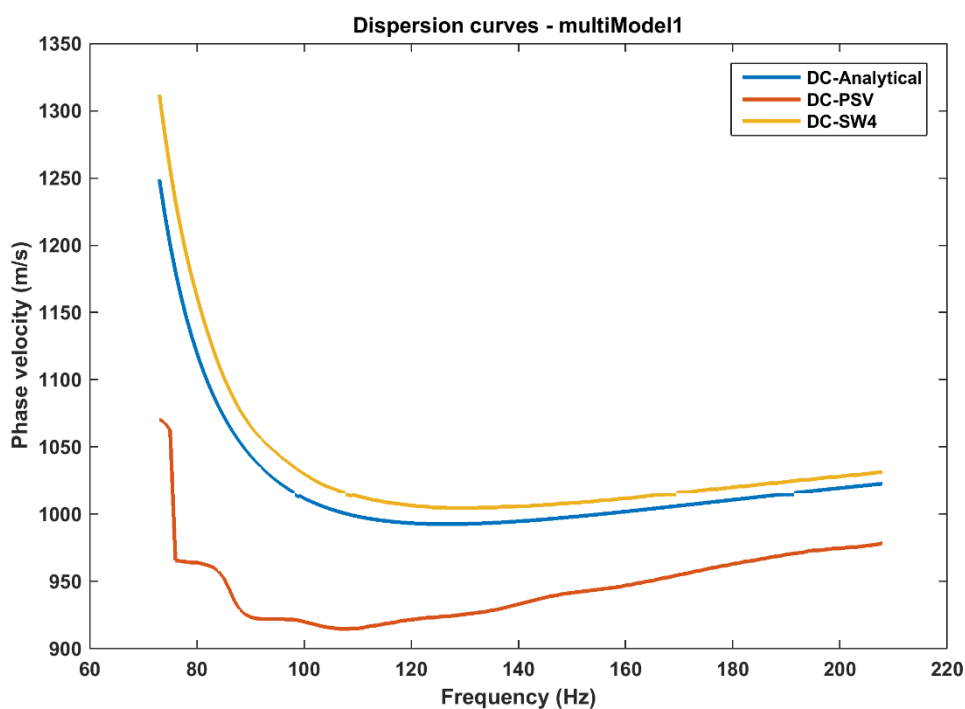
Σχήμα 4.9: Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης για τις καταγραφές του σχήματος 4.8. Η θεμελιώδης καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: |-|).

Στο Σχήμα 4.9 το συχνотικό εύρος της σεισμικής ενέργειας κατανέμεται μεταξύ 25 και 81 Hz ενώ η ταχύτητα φάσης της θεμελιώδους καμπύλης διασποράς παρουσιάζει μεταβολή με τιμές μεταξύ 315.0 και 461.0 m/s.

4.3.3 Σύγκριση καμπύλων διασποράς με την αναλυτική λύση

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται τα διαγράμματα οπτικής σύγκρισης των καμπυλών διασποράς των τεσσάρων μοντέλων καθώς και ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 4.16) σφαλμάτων των μοντέλων αυτών.

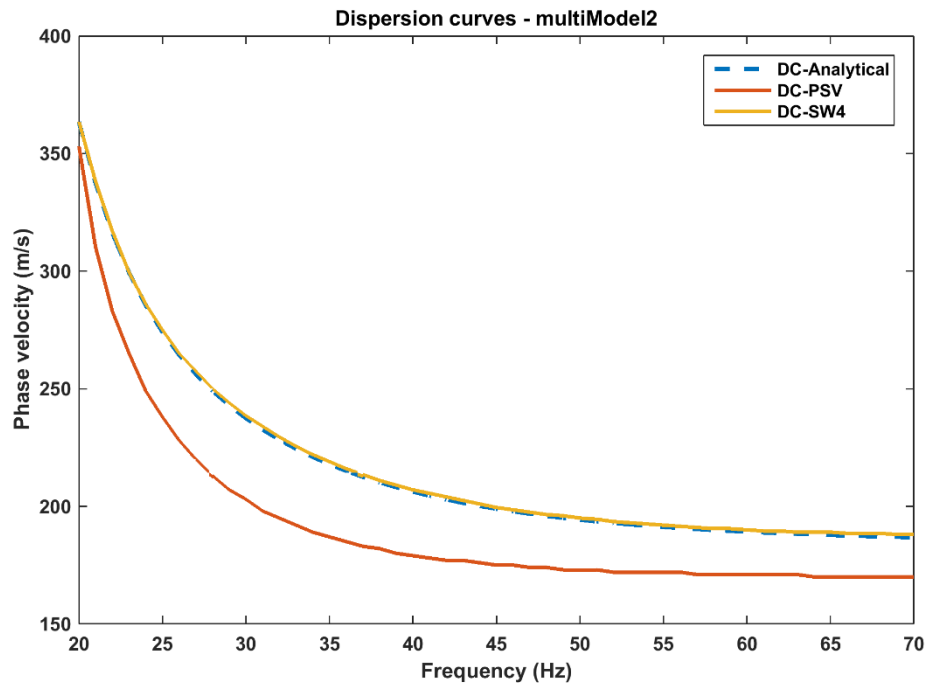
Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζεται το διάγραμμα οπτικής σύγκρισης μεταξύ της αναλυτικής λύσης, των αποτελεσμάτων της μεθόδου PSV – SYNTHETICS και των αποτελεσμάτων της μεθόδου SW4 του πρώτου στρωματωμένου μοντέλου μελέτης. Το συχνοτικό εύρος μελέτης κυμαίνεται μεταξύ των 73 και 208 Hz ενώ η ταχύτητα φάσης λαμβάνει τιμές μεταξύ 1312 και 914.5 m/s.



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα οπτικής σύγκρισης υπολογισμένων καμπυλών διασποράς πρώτου μοντέλου των μεθόδων PSV – SYNTHETICS και SW4 συγκριτικά με την αναλυτική λύση.

Στο σχήμα αυτό παρατηρείται μια μικρή αλλά συστηματική απόκλιση της καμπύλης διασποράς που προέκυψε από την μέθοδο SW4 προς μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας σε σχέση με την αναλυτική λύση. Η καμπύλη διασποράς από τη μέθοδο PSV – SYNTHETICS παρουσιάζει, αφενώς μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με την αναλυτική λύση και αφετέρου, διαφοροποιήσεις ως προς την αναμενόμενη ομαλή μορφή της καμπύλης διασποράς.

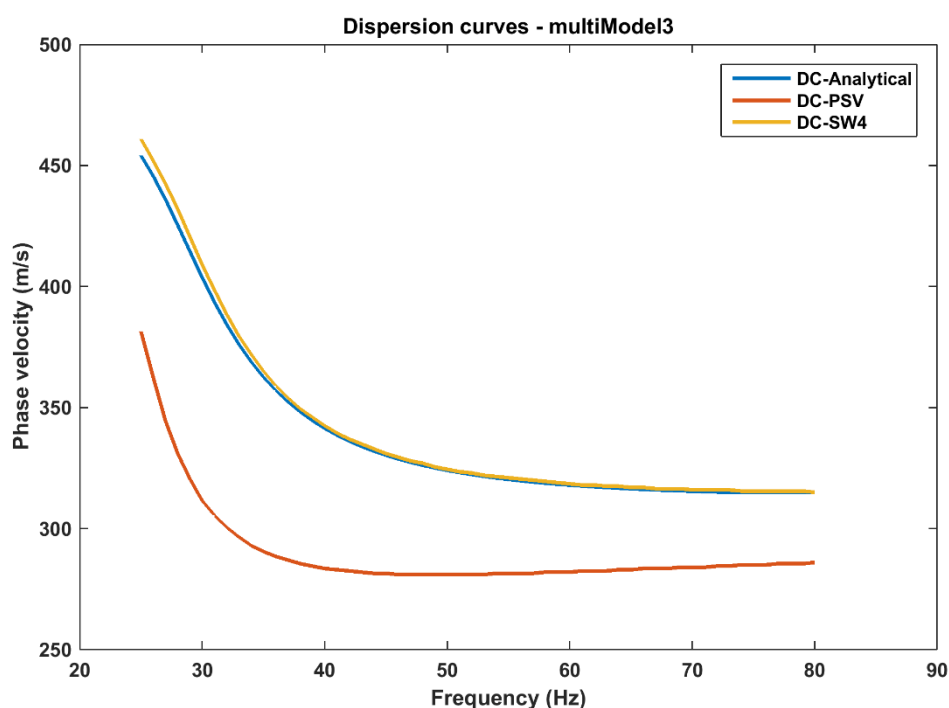
Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζεται το διάγραμμα οπτικής σύγκρισης μεταξύ της αναλυτικής λύσης, των αποτελεσμάτων της μεθόδου PSV – SYNTHETICS και των αποτελεσμάτων της μεθόδου SW4 του 2^{ου} στρωματωμένου μοντέλου μελέτης. Το συχνοτικό εύρος μελέτης κυμαίνεται μεταξύ των 20 και 70 Hz ενώ η ταχύτητα φάσης λαμβάνει τιμές μεταξύ 363.5 και 170 m/s.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα οπτικής σύγκρισης υπολογισμένων καμπυλών διασποράς δεύτερου μοντέλου των μεθόδων PSV – SYNTHETICS και SW4 συγκριτικά με την αναλυτική λύση.

Στο σχήμα αυτό παρατηρείται σχεδόν ταύτιση της αναλυτικής λύσης και της καμπύλης διασποράς που προέκυψε από την μέθοδο SW4. Η καμπύλη διασποράς από την μέθοδο PSV – SYNTHETICS παρουσιάζει, μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με την αναλυτική λύση στις υψηλές συχνότητες.

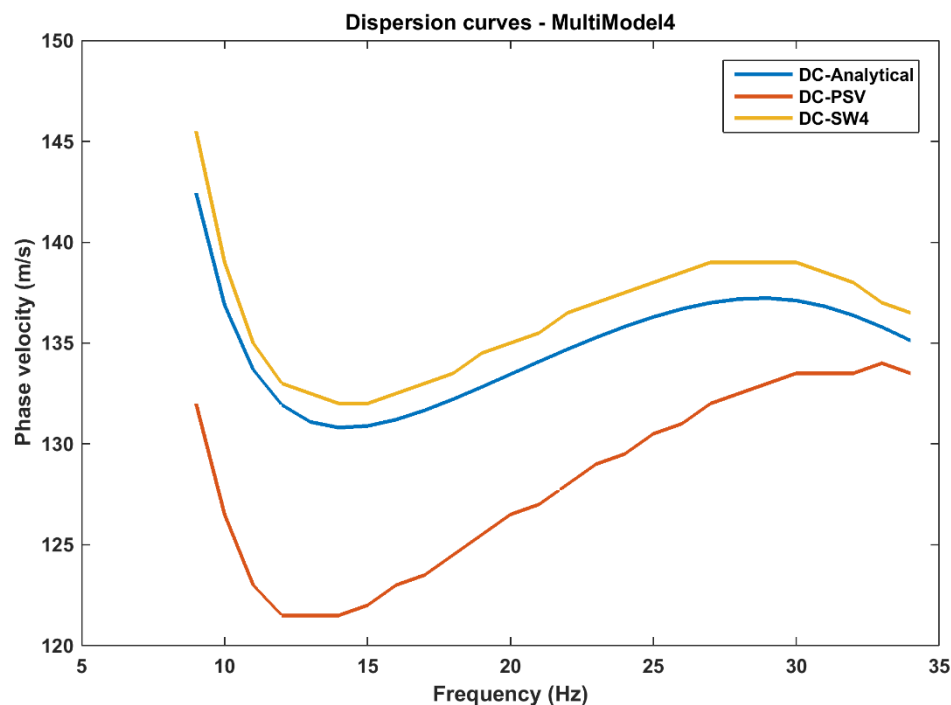
Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζεται το διάγραμμα οπτικής σύγκρισης μεταξύ της αναλυτικής λύσης, των αποτελεσμάτων της μεθόδου PSV – SYNTHETICS και των αποτελεσμάτων της μεθόδου SW4 του 3^{ου} στρωματωμένου μοντέλου μελέτης. Το συχνοτικό εύρος μελέτης κυμαίνεται μεταξύ των 25 και 80 Hz ενώ η ταχύτητα φάσης λαμβάνει τιμές μεταξύ 461 και 281 m/s.



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα οπτικής σύγκρισης υπολογισμένων καμπυλών διασποράς τρίτου μοντέλου των μεθόδων PSV – SYNTHETICS και SW4 συγκριτικά με την αναλυτική λύση.

Στο σχήμα αυτό παρατηρείται σχεδόν ταύτιση της καμπύλης διασποράς που προέκυψε από την μέθοδο SW4 κυρίως κατά την αύξηση της συχνότητας σε σχέση με την αναλυτική λύση. Η καμπύλη διασποράς από την μέθοδο PSV – SYNTHETICS παρουσιάζει, μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με την αναλυτική λύση σε όλο το συχνοτικό εύρος ακολουθώντας όμως κοινή σχετικά ομοιομορφία καμπύλης.

Στο σχήμα 4.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα οπτικής σύγκρισης μεταξύ της αναλυτικής λύσης, των αποτελεσμάτων της μεθόδου PSV – SYNTHETICS και των αποτελεσμάτων της μεθόδου SW4 του 4^{ου} πολυστρωματικού μοντέλου μελέτης. Το συχνοτικό εύρος μελέτης κυμαίνεται μεταξύ των 9 και 34 Hz ενώ η ταχύτητα φάσης λαμβάνει τιμές μεταξύ 145.5 και 121.5 m/s.



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα οπτικής σύγκρισης υπολογισμένων καμπυλών διασποράς τέταρτου μοντέλου των μεθόδων PSV – SYNTHETICS και SW4 συγκριτικά με την αναλυτική λύση.

Στο σχήμα αυτό παρατηρείται μια μικρή και σχετικά αυξανόμενη απόκλιση της καμπύλης διασποράς που προέκυψε από την μέθοδο SW4 σε σχέση με την αναλυτική λύση. Η καμπύλη διασποράς από την μέθοδο PSV – SYNTHETICS παρουσιάζει, μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με την αναλυτική λύση και μείωση αυτής κατά την αύξηση της συχνότητας.

Πίνακας 4.17: Υπολογισμός του μέσου απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος μεταξύ αναλυτικών και πειραματικών καμπύλων διασποράς και της αντίστοιχης τυπικής απόκλισης για τα τέσσερα στρωματωμένα μοντέλα.

		SW4	PSV - SYNTHETICS	Αριθμός κόμβων/ λ_{\min}
Model1	Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)	1.4718	7.1725	8.0
	Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)	0.9076	2.9443	
Model2	Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)	0.4125	11.3712	6.21
	Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)	0.1364	2.4038	
Model3	Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)	0.4304	9.5361	10.56
	Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)	0.4237	2.1329	
Model4	Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)	1.4095	4.9703	6.4
	Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)	0.8861	3.2946	

Συμπερασματικά, προκύπτει πως η προσομοίωση με τον αλγόριθμο SW4 προσεγγίζει με μικρότερο σφάλμα την αναλυτική λύση, σε αντίθεση με τον αλγόριθμο PSV – SYNTHETICS ο οποίος παρουσιάζει εμφανώς μεγαλύτερα σφάλματα. Επίσης, παρατηρείται αύξηση του σφάλματος κατά τον αλγόριθμο SW4 στο πρώτο και τέταρτο μοντέλο. Το γεγονός αυτό ενδεχομένως οφείλεται στην αναστροφή ταχυτήτων ($V_{s2} < V_{s1} \ \& \ V_{s3}$) που παρατηρείται στα μοντέλα αυτά. Από την αντιπαραβολή των τιμών των σφαλμάτων με τον αριθμό των κόμβων ανά ελάχιστο μήκος κύματος (Πίνακας 4.17) στην μελέτη όμως διαφορετικών μοντέλων, δεν προκύπτει κάποιο ασφαλές συμπέρασμα που να συσχετίζει τις δύο αυτές παραμέτρους.

4.4 Μελέτη υποβάθμισης συχνότητας στους αλγορίθμους του PSV – SYNTHETICS

Σύμφωνα με την κατανομή της σεισμικής ενέργειας στο πεδίο συχνότητας – ταχύτητας φάσης τόσο για τα ομοιογενή, όσο και για τα πολυστρωματικά μοντέλα, παρατηρείται υποβάθμιση της συχνότητας στα δεδομένα των αλγορίθμων PSV – SYNTHETICS.

Για την μελέτη και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την υποβάθμιση της συχνότητας στους αλγορίθμους PSV – SYNTHETICS δημιουργήθηκαν 3 νέα μοντέλα τα οποία περιγράφονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 4.18: Γεωμετρία και ιδιότητες του πρώτου ομοιογενούς μοντέλου μελέτης της συχνοτικής υποβάθμισης, με απορροφητικά όρια.

Ομοιογενές μοντέλο με απορροφητικά όρια σε όλες τις πλευρές του μοντέλου	PSV-SYNTHETICS
Διαστάσεις Μοντέλου (X , Z) (m)	640 , 320
V_p (m/s)	1732.0
V_s (m/s)	1000.0
ρ (g/cm ³)	2.000
Πλέγμα (m)	1
Θέση πηγής (X , Z) (m)	320 , 5
Συχνότητα (Hz)	50
Θέσεις δεκτών (X , Z) (m)	1:1:640 x 0

Πίνακας 4.19: Γεωμετρία πολυστρωματικού μοντέλου μελέτης της συχνοτικής υποβάθμισης, με απορροφητικά όρια.

Μοντέλο 2 στρωμάτων με απορροφητικά όρια σε όλες τις πλευρές του μοντέλου	PSV-SYNTHETICS
Διαστάσεις Μοντέλου (X , Z) (m)	640 , 320
Πλέγμα (m)	1
Θέση πηγής (X , Z) (m)	320 , 5
Συχνότητα (Hz)	50
Θέσεις δεκτών (X , Z) (m)	1:1:640 , 0

Πίνακας 4.20: Ιδιότητες των στρωμάτων που αντιστοιχούν στον πίνακα 4.18

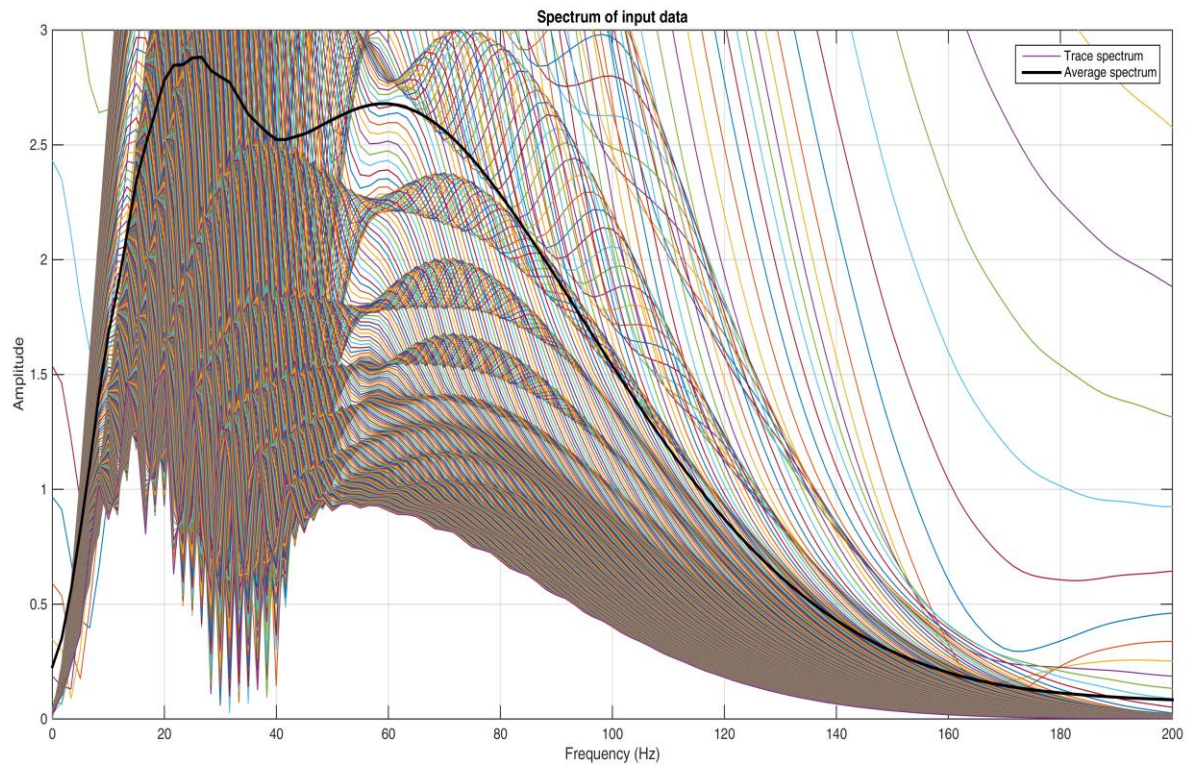
Στρώμα	Πάχος (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (g/cm ³)
1	200.0	1732.0	1000.0	2.000
2	120.0	2500	1443.4	2.200

Πίνακας 4.21: Γεωμετρία και ιδιότητες του δεύτερου ομοιογενούς μοντέλου μελέτης της συχνοτικής υποβάθμισης, με ελεύθερη επιφάνεια.

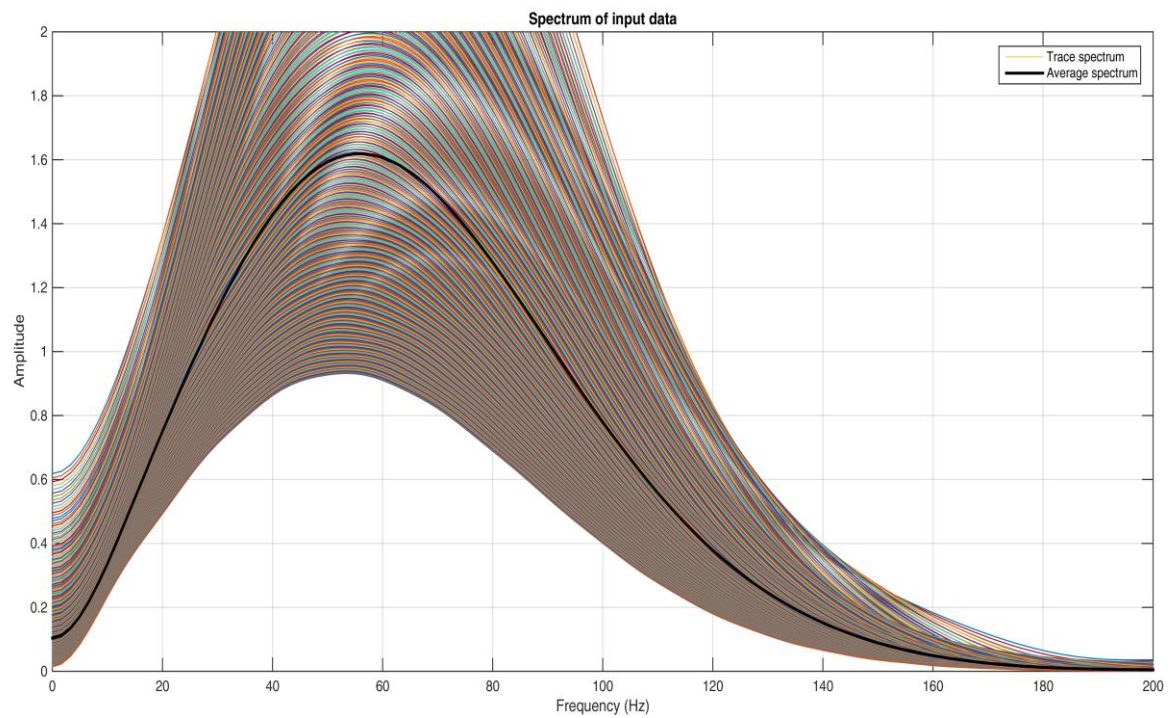
Ομοιογενές Μοντέλο με Ελεύθερη Επιφάνεια	PSV-SYNTHETICS
Διαστάσεις Μοντέλου (X , Z) (m)	640 x 320
V_p (m/s)	1732.0
V_s (m/s)	1000.0
ρ (g/cm ³)	2.000
Πλέγμα (m)	1
Θέση πηγής (X , Z) (m)	320 x 5
Συχνότητα (Hz)	50
Θέσεις δεκτών (X , Z) (m)	1 : 640 x 0

Ενδεικτικά παρουσιάζεται το πιο σημαντικό αποτέλεσμα, αυτό του ομοιογενούς μοντέλου με ελεύθερη επιφάνεια (Πίνακας 4.2). Σύμφωνα με το συχνοτικό φάσμα (Σχήμα 4.14) των συνθετικών σεισμικών ιχνών της κατακόρυφης (Z) συνιστώσας, παρατηρείται πως υπάρχουν 2 μέγιστα στο μέσο φάσμα : α) 25Hz και β) 60Hz. Στην συνέχεια απομονώθηκαν τα απευθείας κύματα (DirectWaves) (Σχήμα 4.15) και τα επιφανειακά κύματα (SurfaceWaves) (Σχήμα 4.16) των ίδιων καταγραφών και υπολογίστηκαν εκ νέου τα φάσματα των νέων αυτών δεδομένων. Προέκυψε ότι το μέσο φάσμα στα επιφανειακά κύματα είναι 22Hz ενώ στα απευθείας κύματα 55Hz. Για το μοντέλο του ομοιογενούς ημιχώρου με απορροφητικά όρια και στην επιφάνεια, το συχνοτικό φάσμα των συνθετικών σεισμικών ιχνών της Z συνιστώσας παρουσιάζει κεντρική μέση συχνότητα ίση με 63Hz ενώ η κυρίαρχη συχνότητα της πηγής έχει οριστεί στα 50Hz. Σχετικά παρόμοιο αποτέλεσμα προκύπτει και στο μοντέλο με 2 στρώματα

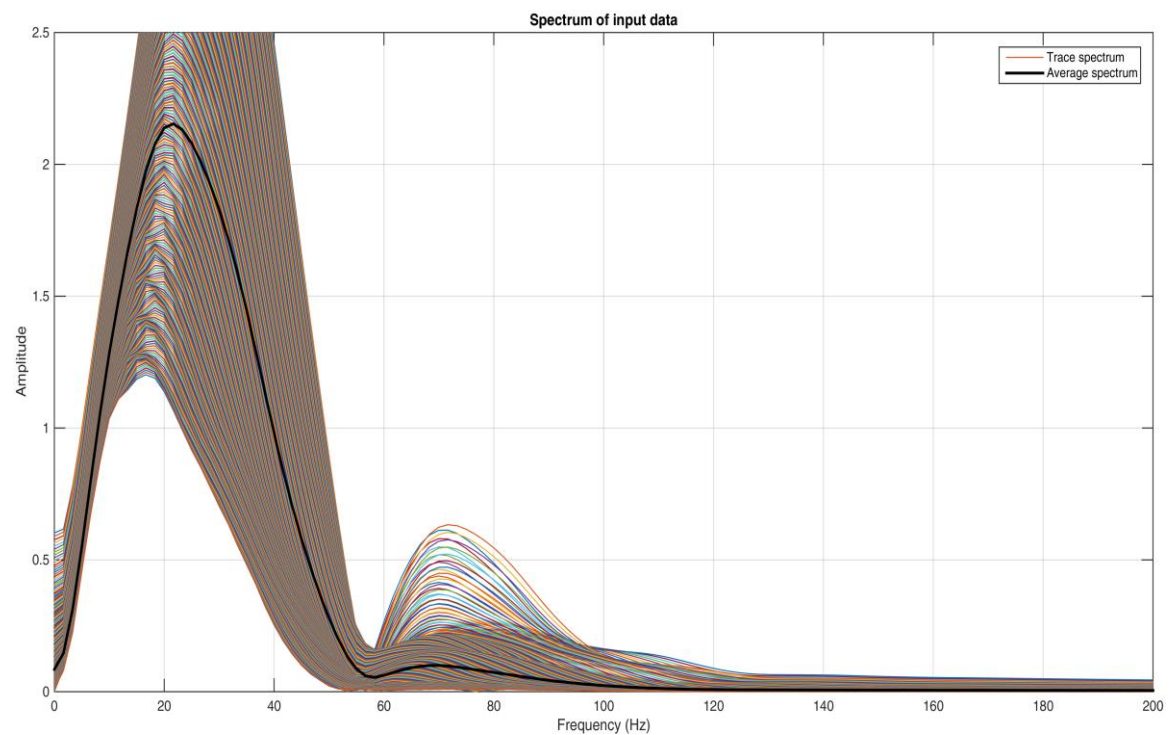
και απορροφητικά όρια στην επιφάνεια. Το συχνοτικό φάσμα των καταγεγραμμένων σεισμικών ιχνών στη Z συνιστώσα κατέχει κεντρική μέση συχνότητα ίση με 60Hz. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων δύο μοντέλων παραθέτονται στο παράρτημα Γ'.



Σχήμα 4.14: Συχνοτικό φάσμα ομοιογενούς μοντέλου χωρίς απορροφητικά όρια στην επιφάνεια. Οριζόντιος άξονας συχνότητα και κατακόρυφος πλάτος.



Σχήμα 4.15: Συχνотικό φάσμα ομοιογενούς μοντέλου χωρίς απορροφητικά όρια στην επιφάνεια. Απομονωμένα απευθείας κύματα. Οριζόντιος άξονας συχνότητα και κατακόρυφος πλάτος.



Σχήμα 4.16: Συχνотικό φάσμα ομοιογενούς μοντέλου χωρίς απορροφητικά όρια στην επιφάνεια. Απομονωμένα επιφανειακά κύματα. Οριζόντιος άξονας συχνότητα και κατακόρυφος πλάτος.

Συμπερασματικά, οι συνοριακές συνθήκες της ελεύθερης επιφάνειας στους αλγόριθμους του PSV – SYNTHETICS δημιουργούν επιφανειακά κύματα με κυρίαρχη συχνότητα σημαντικά μικρότερη (25Hz) από αυτή της σεισμικής πηγής (50Hz). Τα απευθείας κύματα (και πιθανόν οποιαδήποτε ανακλώμενα κύματα, όπως συμπεραίνεται από την περίπτωση του πολυστρωματικού μοντέλου (βλ. Παράρτημα Γ) που δημιουργούνται σε μοντέλο με ελεύθερη επιφάνεια, φαίνεται να διακρίνονται από κυρίαρχη συχνότητα λίγο μεγαλύτερη (60Hz) από αυτή της πηγής (50Hz).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η μελέτη και η σύγκριση προσομοιωτών διάδοσης επιφανειακών σεισμικών κυμάτων Rayleigh μεταξύ 2 διαφορετικών αριθμητικών σχημάτων Πεπερασμένων Διαφορών του αλγόριθμου SW4 και του αλγόριθμου PSV – SYNTHETICS, είναι το κύριο αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η μελέτη και εξαγωγή αποτελεσμάτων βασίστηκε σε μοντέλα ομοιογενούς ημιχώρου (διπλωματική εργασία Καραμούτσου, 2020) και σε πολυστρωματικά μοντέλα από τη διεθνή βιβλιογραφία (βλ. Κρητικάκης, 2010).

Σύμφωνα με τα εξαγόμενα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν, αρχικά για τον ομοιογενή σχηματισμό, συμπεραίνεται πως η βέλτιστη θέση των γεωφώνων, με την ελάχιστη τυπική απόκλιση (0.71 %) αντιστοιχεί στις θέσεις κόμβων πλήρους δεξιάς κάλυψης για Grid = 1m για τον αλγόριθμο PSV – SYNTHETICS και αντίστοιχα στις θέσεις κόμβων από 370 έως 610m με ίδιο πλέγμα (Grid = 1m) για τον αλγόριθμο SW4 (0.052%) . Ως προς το μέσο απόλυτο εκατοστιαίο σφάλμα, ο αλγόριθμος PSV – SYNTHETICS εμφανίζει ελάχιστο σφάλμα (4.80%) στις θέσεις κόμβων μεταξύ 400 και 640 m και Grid = 1.25 m, ενώ μέγιστο σφάλμα (5.52%) με πλήρης δεξιά κάλυψη δεκτών από την πηγή και Grid = 1m. Ο αλγόριθμος SW4 από την άλλη μεριά, εμφανίζει ελάχιστο απόλυτο εκατοστιαίο σφάλμα (0.0776%) στις θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς κάλυψης από την πηγή και Grid = 1 m, ενώ το μέγιστο απόλυτο εκατοστιαίο σφάλμα (0.1303 %) στις θέσεις δεκτών μεταξύ 370 και 610 m και διάσταση χωρίου 1 m.

Θεωρητικά, η διαφοροποίηση της τιμής της διάστασης του χωρίου (1 m, 1.25 m) επηρεάζει τον αριθμό των κόμβων ανά ελάχιστο μήκος κύματος. Όσο μεγαλύτερος λόγος ($\lambda_{\min}/\text{grid}$) τόσο μεγαλύτερη είναι η αναμενόμενη ακρίβεια του αριθμητικού σχήματος. Κατά τον αλγόριθμο SW4 το πλέγμα με διάσταση χωρίου 1 m και δέκτες πλήρους δεξιάς κάλυψης εμφανίζει μικρότερο σφάλμα από το αντίστοιχο μοντέλο με διάσταση χωρίου 1.25 m. Συμπεραίνεται πως η γενική αρχή του αριθμού κόμβων ανά ελάχιστο μήκος κύματος επαληθεύεται στη συγκεκριμένη περίπτωση. Ωστόσο, δεν παρουσιάζει επαναληψιμότητα

καθώς τα υπόλοιπα μοντέλα εμφανίζουν μικρότερο σφάλμα με διάσταση χωρίου 1.25 m και για τους 2 αλγόριθμους.

Από την ολοκλήρωση και επεξεργασία των προσομοιώσεων για τα πολυστρωματικά μοντέλα παρατηρείται πως κατά τον αλγόριθμο PSV – SYNTHETICS το τρίτο μοντέλο παρουσιάζει το ελάχιστον σφάλμα τυπικής απόκλισης (2.13%), έναντι του δεύτερου μοντέλου κατά τον αλγόριθμο SW4 (0.14 %). Ως προς το μέσο απόλυτο εκατοστιαίο σφάλμα, ο αλγόριθμος PSV – SYNTHETICS παρουσιάζει ελάχιστο σφάλμα (4.97%) στο τέταρτο μοντέλο, ενώ μέγιστο (11.37%) στο δεύτερο μοντέλο. Σε σχέση με τον αλγόριθμο SW4 το ελάχιστο απόλυτο εκατοστιαίο σφάλμα (0.41%) εμφανίζεται στο δεύτερο μοντέλο, ενώ το μέγιστο αντίστοιχο σφάλμα (1.42%) στο πρώτο μοντέλο. Σε όλες τις περιπτώσεις των πολυστρωματικών μοντέλων οι δέκτες τοποθετούνται δεξιά της πηγής και εκτείνονται έως το τέλος του μοντέλου με Grid = 0.25 m.

Κατά τον αλγόριθμο SW4 των πολυστρωματικών μοντέλων, εμφανίζονται μεγαλύτερα σφάλματα στο πρώτο και τέταρτο μοντέλο έναντι του δεύτερου και τρίτου. Τα μεγαλύτερα σφάλματα ενδεχομένως οφείλονται στην αναστροφή των ταχυτήτων ($V_{s2} < V_{s1} < V_{s3}$) που παρατηρείται στα μοντέλα αυτά. Επομένως, το σφάλμα στις καμπύλες διασποράς εξαρτάται και κατά πόσο σύνθετο είναι το μοντέλο.

Από την αντιπαραβολή των τιμών των σφαλμάτων με τον αριθμό των κόμβων ανά ελάχιστο μήκος κύματος στην μελέτη, όμως διαφορετικών πολυστρωματικών μοντέλων, δεν προκύπτει κάποιο ασφαλές συμπέρασμα που να συσχετίζει τις δύο αυτές παραμέτρους.

Αμφότερα και τα 2 είδη μοντέλων (ομοιογενή και πολυστρωματικά) εμφανίζουν συχνοτική υποβάθμιση των δεδομένων του αλγορίθμου PSV – SYNTHETICS για τα επιφανειακά κύματα. Συγκεκριμένα, για μοντέλο χωρίς απορροφητικά όρια στην επιφάνεια, η κυρίαρχη συχνότητα μειώνεται περίπου στην μισή τιμή, έναντι αυτής της σεισμικής πηγής. Αντίθετα, τα απευθείας κύματα καθώς και τα ανακλώμενα εμφανίζουν ελάχιστα αυξημένη συχνότητα από αυτή της σεισμικής πηγής.

Ο χρόνος ολοκλήρωσης των προσομοιώσεων είναι ένας σημαντικός παράγοντας επιλογής της μεθόδου. Η ολοκλήρωση της προσομοίωσης του αλγορίθμου PSV – SYNTHETICS στα μοντέλα που μελετήθηκαν, είναι κατά το 1/3 του χρόνου ολοκλήρωσης της προσομοίωσης κατά SW4 ταχύτερα. Για παράδειγμα, το δεύτερο πολυστρωματικό μοντέλο κατά τον αλγόριθμο SW4 χρειάζεται σχεδόν 37 ώρες για την ολοκλήρωσή του. Αντίθετα, το ίδιο μοντέλο σύμφωνα με τον αλγόριθμο PSV – SYNTHETICS χρειάζεται 12 ώρες και 22 λεπτά.

Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στον παράγοντα της τρίτης διάστασης που εισάγεται στον αλγόριθμο SW4, χωρίς να είναι όμως απαραίτητη για την μελέτη πολυστρωματικών μέσων, έναντι των 2 διαστάσεων που είναι σχεδιασμένος ο αλγόριθμος PSV – SYNTHETICS.

Γενικά, οι αλγόριθμοι 2 διαστάσεων θα πρέπει να προτιμώνται όταν μελετώνται μοντέλα που δεν μεταβάλλονται στην 3^η διάσταση, υπό την προϋπόθεση ότι αυτοί δίνουν αντίστοιχης ακρίβειας αποτελέσματα. Στην προκειμένη όμως περίπτωση, οι αλγόριθμοι SW4 παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια ως προς τον υπολογισμό των καμπύλων διασποράς.

Τέλος, συμπεραίνεται πως η επιλογή του αλγορίθμου SW4, για την προσέγγιση μιας αναλυτικής λύσης είναι η βέλτιστη ως προς το παραγόμενο σφάλμα. Ο μόνος ανασταλτικός παράγοντας επιλογής του είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης της εκάστοτε προσομοίωσης. Στην συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκαν συνθετικά δεδομένα από μοντέλα 2 διαστάσεων. Οι αλγόριθμοι SW4 προφανώς πλεονεκτούν έναντι αυτών του PSV – SYNTHETICS σε περιπτώσεις μεταβολής των παραμέτρων του μοντέλου στις 3 διαστάσεις.

Σχετικά με τον αλγόριθμο SW4, πρέπει να εξεταστεί αν μειώνεται το σφάλμα του στα μοντέλα με αύξηση του αριθμού των κόμβων ανά ελάχιστο μήκος κύματος (Grid).

Από την άλλη μεριά ο αλγόριθμος PSV – SYNTHETICS χρήζει περισσότερης μελέτης καθώς και διόρθωσης του, σχετικά με την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών στην ελεύθερη επιφάνεια, οι οποίοι σίγουρα σχετίζονται με την συχνотική υποβάθμιση των παραγόμενων επιφανειακών κυμάτων και πιθανόν με την υποβάθμιση της ακρίβειας προσδιορισμού των καμπυλών διασποράς. Επίσης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η αναλυτική λύση αναφέρεται για σεισμική πηγή στην επιφάνεια της γης και όχι σε κάποιο βάθος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΔΗΜΟΣΙΕΥΜΕΝΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

1. **Becker, EG, Iturrioz, I & Clarke, T 2018**, 'The dispersion curve applied in guided wave propagation in prismatic rods. *Latin American Journal of Solids and Structures*', [online] 15(6). Available at: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1679-78252018000600504&script=sci_arttext#:~:text=The%20dispersion%20curves%20are%20a%20set%20of%20curves%20that%20represent,and%20group%20velocity%20vs%20frequency>. [Accessed 16 September 2020].
2. **Carnione, MJ 2015**, 'Numerical Methods', 3rd edn, Jose M. Carnione (eds), *Wave Fields in Real Media*, pp. 509-573. Trieste, Italy.
3. **Furumura, T 1998**, 'Pseudospectral Simulation of Seismic Wave Propagation', Scientific Research (No.10128202, 10740213), Hokkaido University of Education, Iwamizawa, Japan.
4. **Geevers, S 2018**, 'Finite Element Methods for Seismic Modelling', PhD thesis, University of Twente.
5. **Haskell, N. A., 1953**, 'The dispersion of surface waves in multi-layered media, *Bulletin of Seismological Society of America*', Vol. 43, p. 17 – 34.
6. **Kritikakis, SG & Vafidis, A & Gourry, JC 2004**, 'Ανάλυση των Επιφανειακών Κυμάτων Rayleigh και Εφαρμογή σε Χώρο Απόθεσης Απορριμάτων στη Β.Ιταλία και στη Βιομηχανική Περιοχή Porto Pertoli, Genoa', *Bulletin of the Geological Society of Greece, Proceedings of the 10th International Congress, Thessaloniki*, vol. XXXVI.
7. **Καραμούτσος, ΔΣ 2020**. 'Προσομοίωση Διάδοσης Σεισμικών Κυμάτων με τη Χρήση Αριθμητικών Μεθόδων Υψηλής Τάξης Ακρίβειας', Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
8. **Κρητικάκης Σ. Γιώργος 2000**, 'Συμβολή των Επιφανειακών Κυμάτων Rayleigh στην Εκτίμηση των Μηχανικών Ιδιοτήτων του Υπεδάφους', Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
9. **Κρητικάκης Γεώργιος 2010**, 'Επιφανειακά Κύματα: Εφαρμογές σε Περιβαλλοντικά και Γεωτεχνικά Προβλήματα', Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
10. **Lunedei, E and Malischewsky, P, 2015**, 'A Review and Some New Issues on the Theory of the H/V Technique for Ambient Vibrations. *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology*', [online] vol.39 pp.371-394. Available at: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-16964-4_15> [Accessed 18 August 2020].
11. **Luo, Y., Xia, J., Liu, J., Liu, Q., and Xu, S., 2007**, Joint inversion of high-frequency surfacewaves with fundamental and higher modes, *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 62,p. 375 – 384.
12. **McDonald, M 2012**, 'Numerical Methods in Seismic Wave Propagation (Unpublished master's thesis)'. University of Calgary, Calgary.

13. **McMechan, G. A., and Yedlin, M. J., 1981**, '*Analysis of dispersive waves by wave field transformation*, Geophysics', Vol. 46, p. 869 – 874.
14. **Misiek, R., 1996**, *Surface waves: Application to lithostructural interpretation of near-surface layers in the meter and decameter range*, PhD thesis, University of Ruhr, Bochum, Germany.
15. **Neil, PS, Hashemi, MR 2018**, '*Fundamentals of Ocean Renewable Energy*', *Ocean Modelling for Resource Characterization*, Academic Press, pp. 193-235. [online] Available at: <<https://doi.org/10.1016/C2016-0-00230-9>>. [Accessed 14 September 2020].
16. **Papworths Construction Testing Equipment & Tools 2004**, '*Spectral Analysis of Surface Waves (SASW)*', PCTE, [online] Available at: <<https://www.pcte.com.au/spectral-analysis-of-surface-waves-sasw#:~:text=SASW%20tests%20allow%20the%20user,of%20each%20of%20these%20layers.&text=It%20is%20all%20done%20non,top%20surface%20of%20the%20pavement>>. [Accessed 8 August 2020].
17. **Park, BC, Miller, DR, Xia, J & Ivanov, J 2007**, '*Multichannel analysis of surface waves (MASW) – active and passive methods*', E-Journal of The Leading Edge, vol. 26, no. 1, pp. 60-64, [online] Available at: <<https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.2431832>>. [Accessed 2 August 2020].
18. **Perkins, S 2018**, '*Explainer: Seismic waves come in different “flavors”*', [online] Available at: <<https://www.sciencenewsforstudents.org/article/explainer-seismic-waves-come-different-flavors>>. [Accessed 21 July 2020].
19. **Petersson, NA & Sjogreen, B 2016**, '*Simulating seismic wave propagation with SW4, Computational Infrastructure for Geodynamics*', CIG Tutorial, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA.
20. **Petersson, N.A.; Sjogreen, B 2012**, '*Stable and efficient modeling of anelastic attenuation in seismic wave propagation*', Communications in Computational Physics, 12 (01) , 193-225.
21. **Petersson, N.A.; Sjogreen, B 2014**, '*Super-Grid Modeling of the Elastic Wave Equation in Semi-Bounded Domains*', Communications in Computational Physics, 16 (04) , 913-955, Available at: <http://www.journals.cambridge.org/abstract_S1815240600005806>. [Accessed 9 June 2021].
22. **Petersson, N.A.; Sjogreen, B 2015**, '*Wave propagation in anisotropic elastic materials and curvilinear coordinates using a summation-by-parts finite difference method*', Journal of Computational Physics, 299, 820-841, Available at: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021999115004684>>. [Accessed 9 June 2021].
23. **Roth, M., and Holliger, K 1999**, '*Inversion of source-generated noise in high resolution seismic data*, The Leading Edge, Vol. 18, No 12, p. 1402 – 1406.
24. **Sheriff, R. E., and Geldart, L. P., 1995**, '*Exploration Seismology*, 2nd Edition', Cambridge University Press.
25. **Sjogreen, B.; Petersson, N.A. (2012)**, '*A Fourth Order Accurate Finite Difference Scheme for the Elastic Wave Equation in Second Order Formulation*, Journal of

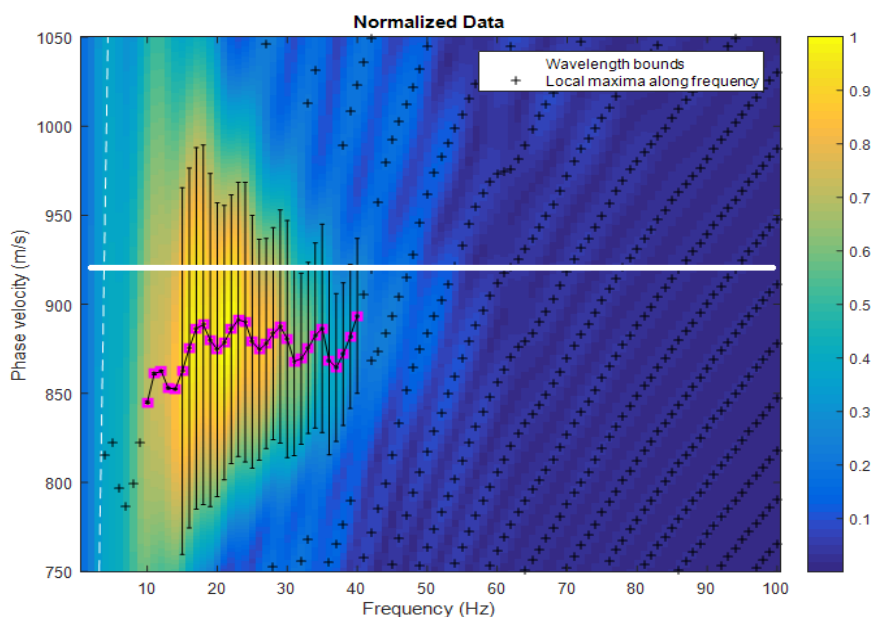
- Scientific Computing*, 52 (1), 17-48, [online] Available at: <<http://link.springer.com/10.1007/s10915-011-9531-1>>. [Accessed 9 June 2021].
26. **Steeple, W. Don 2000**, 'A review of shallow seismic methods', Department of Geology, University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA, vol. 43, no. 6.
 27. **Σκαρλατούδης, Α 2009**, 'Προσομοίωση της Σεισμικής Κίνησης με τη Χρήση Δισδιάστατων και Τρισδιάστατων Μοντέλων', Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
 28. **Thomson, W. T., 1950**, 'Transmission of elastic waves through a stratified solid, *Journal of Applied Physics*', Vol. 21, p. 89 – 93.
 29. **Tokimatsu, K., Tamura, S., and Kojima, H., 1992**, *Effects of multiple modes on Rayleigh wave dispersion*, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 118, p. 1529 – 1543.
 30. **Vafidis, A 1988**. 'Supercomputer finite difference methods for seismic wave propagation', PhD dissertation, The University of Alberta, Canada.
 31. **Virieux, J, Calandra, H & Plessix, RE 2011**, 'A review of the spectral, pseudo – spectral, finite – difference and finite – element modelling techniques for geophysical imaging', *Journal of Geophysical Prospecting*, [online] vol. 59, no. 5, pp. 794-813. Available at: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2011.00967.x>>. [Accessed 10 September 2020].
 32. **Zaiming Jiang 2014**, 'Reverse – time depth migration in elastic media', Article of the CSEG Recorder, Key Seismic Solutions, Calgary, Alberta, Canada.
 33. **Zhang, W, Zhang, Z & Chen, X 2012**, 'Three-dimensional elastic wave numerical modelling in the presence of surface topography by a collocated-grid finite-difference method on curvilinear grids' *Geophysical Journal International*, [online] vol. 190, no. 1, pp. 358-378. Available at: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05472.x>>. [Accessed 14 September 2020].
 34. **Zhao, JG & Shi, RQ 2013**, 'Perfectly matched layer – absorbing boundary condition for finite – element time – domain modeling of elastic wave equations', *E – Journal of Applied Geophysics*, [online] vol. 10, no. 3, pp. 323-336. Available at: <[10.1007/s11770-013-0388-y](http://link.springer.com/10.1007/s11770-013-0388-y)>. [Accessed 17 September 2020].

ΠΗΓΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΑΔΥΚΤΙΟ & ΑΛΛΕΣ ΠΗΓΕΣ

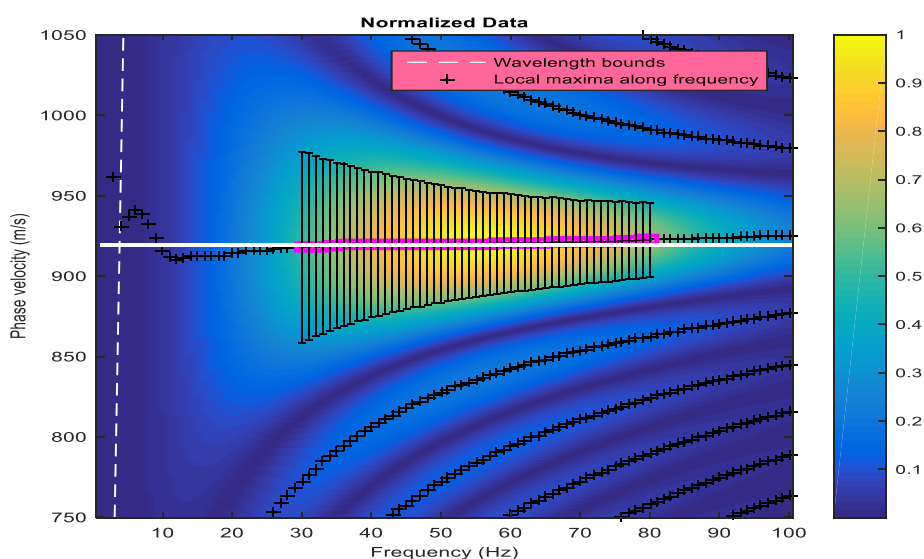
1. **Abhinav, V 2012**, *Seismic wave*, [online] Available at: <<https://www.britannica.com/science/seismic-wave#info-article-history>>. [Accessed 27 July 2020].
2. **British Geological Survey 2017**, *Seismic waves*, [online] Available at: <<http://mobile.bgs.ac.uk/discoveringGeology/hazards/earthquakes/SeismicWaves.html>>. [Accessed 23 July 2020].
3. **DeCross, M, Seemungal, L & Khlm, J 2019**, 'Wave Equation', Brilliant. [online] Available at: <<https://brilliant.org/wiki/wave-equation/>>. [Accessed 8 September 2020].

4. **'Finite element method' 2001**, Wikipedia, wiki, 8 September 2020. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method>. [Accessed 12 September 2020].
5. **'Finite difference method' 2006**, Wikipedia, wiki, 3 September 2020. [online] Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_difference_method>. [Accessed 14 September 2020].
6. **Glossary.oilfield.slb.com 2020**, *Dispersion - Schlumberger Oilfield Glossary*, [online] Available at: <<https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/d/dispersion.aspx>>. [Accessed 16 September 2020].
7. **Harish, A 2020**, *'Implicit vs Explicit Finite Element Method (FEM): What Is the Difference?'*, [online] Available at: <<https://www.simscale.com/blog/2019/01/implicit-vs-explicit-fem/#:~:text=Explicit%20FEM%20is%20used%20to,states%20of%20the%20given%20system>>. [Accessed 12 September 2020].
8. **Park Seismic LLC n.d.**, *'Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)'*, [online] Available at: <<http://www.masw.com/>>. [Accessed 11 August 2020].
9. **Science Learning Hub 2007**, *Seismic waves*, [online] Available at: <<https://www.sciencelearn.org.nz/resources/340-seismic-waves>>. [Accessed 21 July 2020].
10. **Seismic Resilience 2015**, *Surface waves*. [online] Available at: <<http://www.seismicresilience.org.nz/topics/seismic-science-and-site-influences/earthquake-energy/surface-waves/>>. [Accessed 26 July 2020].

Παράρτημα Α'



Σχήμα Α'.1: Ομοιογενές μοντέλο με $Grid = 1.25$ και θέσεις δεκτών από τους 400 έως τους 640 κόμβους. Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης κατά την PSV-SYNTHETICS μέθοδο. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|-|$). Η λευκή οριζόντια γραμμή συμβολίζει την αναλυτική λύση σε ομοιογενές μέσο (919.4 m/s).

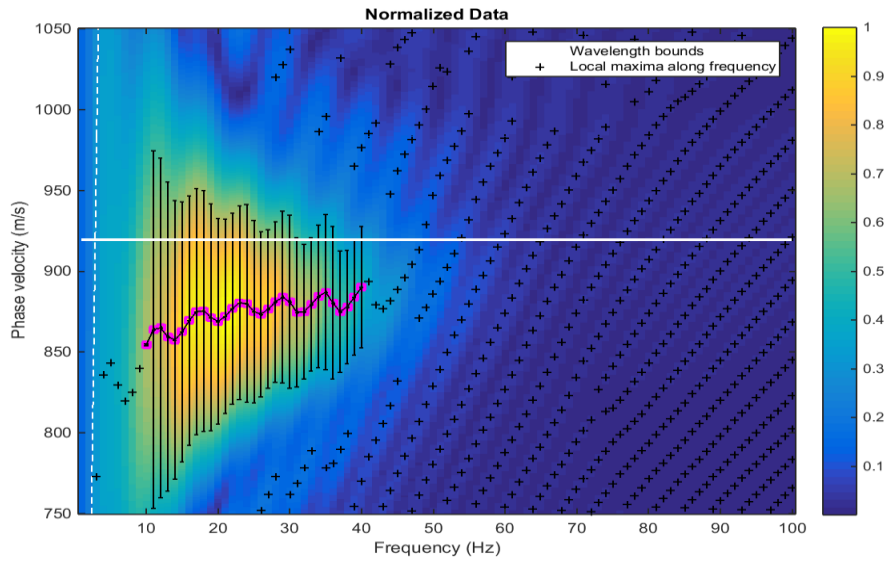


Σχήμα Α'.2: Ομοιογενές μοντέλο με $Grid = 1.25$ και θέσεις δεκτών από τους 370 έως τους 602.5 κόμβους. Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης κατά την SW4 μέθοδο. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|-|$). Η λευκή οριζόντια γραμμή συμβολίζει την αναλυτική λύση σε ομοιογενές μέσο (919.4 m/s).

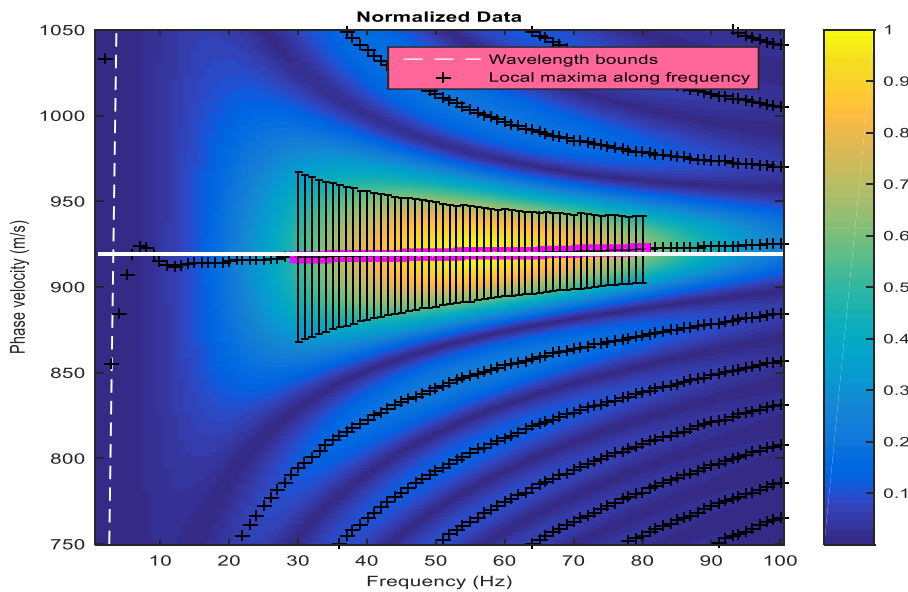
Πίνακας Α'.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής (DCcalc) και υπολογισμένης λύσης (DCobs) του ομοιογενούς μοντέλου με Grid = 1.25 m και θέσεις δεκτών τους 400 έως 640 κόμβους κατά την PSV – SYNTHETICS μέθοδο και 370 έως 610 κόμβους κατά την SW4 μέθοδο. Υπολογισμός μέσης (Average) και τυπικής απόκλισης (STDEV) ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος.

Συχνότητα (Hz)	PSV – SYNTHETICS			SW4		
	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR
10	845	919.4	8.0922			
11	861	919.4	6.3520			
12	862.5	919.4	6.1888			
13	853	919.4	7.2221			
14	852.5	919.4	7.2765			
15	862.5	919.4	6.1888			
16	875.5	919.4	4.7749			
17	886.5	919.4	3.5784			
18	888.5	919.4	3.3609			
19	880	919.4	4.2854			
20	874.5	919.4	4.8836			
21	878.5	919.4	4.4486			
22	886	919.4	3.6328			
23	891.5	919.4	3.0346			
24	890	919.4	3.1977			
25	879	919.4	4.3942			
26	874.5	919.4	4.8836			
27	878	919.4	4.5029			
28	883.5	919.4	3.9047			
29	887.5	919.4	3.4697			
30	880.5	919.4	4.2310	918	919.4	0.1523
31	868	919.4	5.5906	918.5	919.4	0.0979
32	869.5	919.4	5.4275	918.5	919.4	0.0979
33	875.5	919.4	4.7749	918.5	919.4	0.0979
34	882.5	919.4	4.0135	919	919.4	0.0435
35	886.5	919.4	3.5784	919	919.4	0.0435
36	868.5	919.4	5.5362	919.5	919.4	0.0109
37	864.5	919.4	5.9713	919.5	919.4	0.0109
38	872	919.4	5.1555	919.5	919.4	0.0109
39	882	919.4	4.0679	919.5	919.4	0.0109
40	893.5	919.4	2.8171	919.5	919.4	0.0109
41				920	919.4	0.0653
42				920	919.4	0.0653
43				920	919.4	0.0653
44				920	919.4	0.0653
45				920	919.4	0.0653
46				920	919.4	0.0653
47				920	919.4	0.0653

48				920	919.4	0.0653
49				920	919.4	0.0653
50				920	919.4	0.0653
51				920	919.4	0.0653
52				920	919.4	0.0653
53				920	919.4	0.0653
54				920	919.4	0.0653
55				920	919.4	0.0653
56				920	919.4	0.0653
57				920	919.4	0.0653
58				920.5	919.4	0.1196
59				920.5	919.4	0.1196
60				920.5	919.4	0.1196
61				920.5	919.4	0.1196
62				920.5	919.4	0.1196
63				920.5	919.4	0.1196
64				920.5	919.4	0.1196
65				920.5	919.4	0.1196
66				921	919.4	0.1740
67				921	919.4	0.1740
68				921	919.4	0.1740
69				921	919.4	0.1740
70				921	919.4	0.1740
71				921.5	919.4	0.2284
72				921.5	919.4	0.2284
73				921.5	919.4	0.2284
74				921.5	919.4	0.2284
75				921.5	919.4	0.2284
76				922	919.4	0.2828
77				922	919.4	0.2828
78				922	919.4	0.2828
79				922.5	919.4	0.3372
80				922.5	919.4	0.3372
Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)			4.8012			0.1213
Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)			1.3280			0.0862



Σχήμα Α'.3: Ομοιογενές μοντέλο με $Grid = 1.25$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης. Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης κατά την PSV-SYNTHETICS μέθοδο. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|-|$). Η λευκή οριζόντια γραμμή συμβολίζει την αναλυτική λύση σε ομοιογενές μέσο (919.4 m/s).

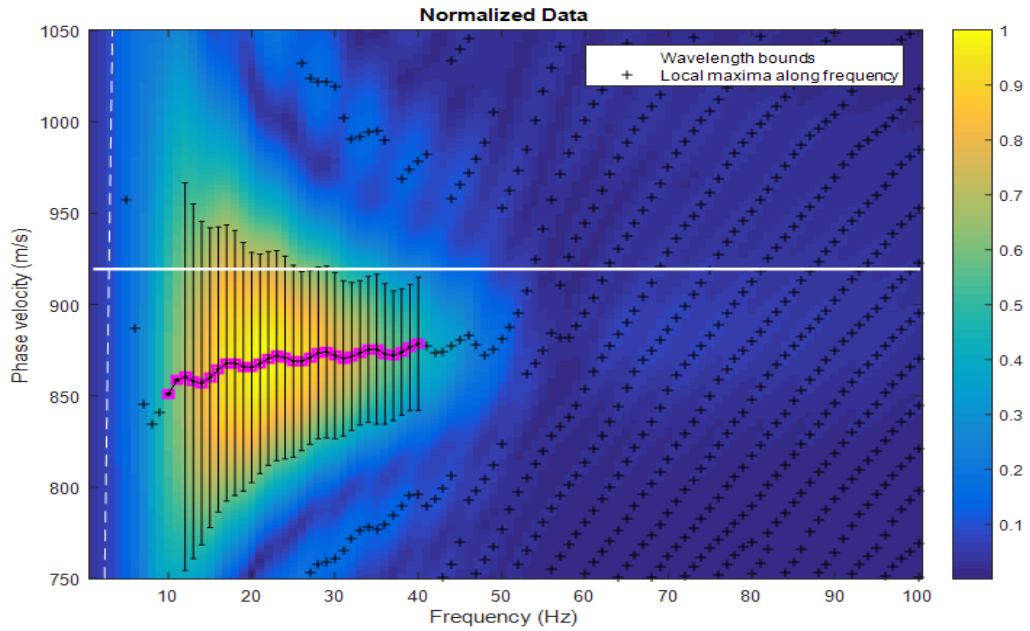


Σχήμα Α'.4: Ομοιογενές μοντέλο με $Grid = 1.25$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης. Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης κατά την SW4 μέθοδο. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|-|$). Η λευκή οριζόντια γραμμή συμβολίζει την αναλυτική λύση σε ομοιογενές μέσο (919.4 m/s).

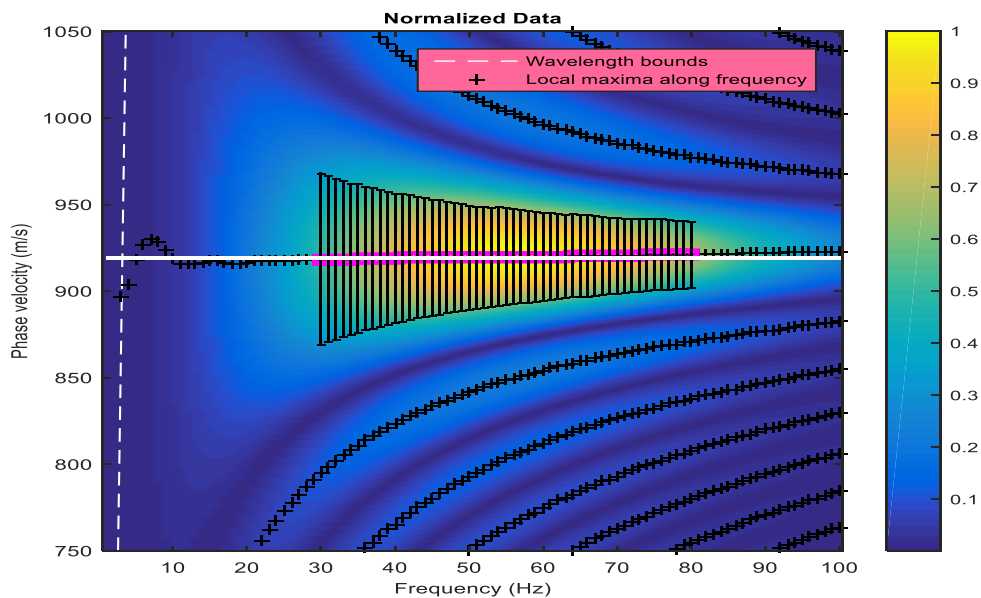
Πίνακας Α'.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής (DCcalc) και υπολογισμένης λύσης (DCobs) του ομοιογενούς μοντέλου με Grid = 1.25 m και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης κατά την PSV – SYNTHETICS και SW4 μέθοδο. Υπολογισμός μέσης (Average) και τυπικής απόκλισης (STDEV) ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος.

Συχνότητα (Hz)	PSV – SYNTHETICS			SW4		
	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR
10	854.5	919.4	7.0590			
11	864	919.4	6.0257			
12	865	919.4	5.9169			
13	859.5	919.4	6.5151			
14	857.5	919.4	6.7327			
15	862.5	919.4	6.1888			
16	869.5	919.4	5.4275			
17	875	919.4	4.8292			
18	875.5	919.4	4.7749			
19	871.5	919.4	5.2099			
20	869	919.4	5.4818			
21	872	919.4	5.1555			
22	877	919.4	4.6117			
23	880.5	919.4	4.2310			
24	880	919.4	4.2854			
25	875	919.4	4.8292			
26	873.5	919.4	4.9924			
27	876.5	919.4	4.6661			
28	881	919.4	4.1766			
29	884	919.4	3.8503			
30	881	919.4	4.1766	917.5	919.4	0.2067
31	874.5	919.4	4.8836	917.5	919.4	0.2067
32	875	919.4	4.8292	917.5	919.4	0.2067
33	879.5	919.4	4.3398	917.5	919.4	0.2067
34	884.5	919.4	3.7960	917.5	919.4	0.2067
35	887	919.4	3.5240	918	919.4	0.1523
36	880.5	919.4	4.2310	918	919.4	0.1523
37	875	919.4	4.8292	918	919.4	0.1523
38	878	919.4	4.5029	918	919.4	0.1523
39	884	919.4	3.8503	918	919.4	0.1523
40	890	919.4	3.1977	918.5	919.4	0.0979
41				918.5	919.4	0.0979
42				918.5	919.4	0.0979
43				918.5	919.4	0.0979
44				918.5	919.4	0.0979
45				918.5	919.4	0.0979
46				919	919.4	0.0435
47				919	919.4	0.0435

48				919	919.4	0.0435
49				919	919.4	0.0435
50				919	919.4	0.0435
51				919	919.4	0.0435
52				919	919.4	0.0435
53				919	919.4	0.0435
54				919.5	919.4	0.0109
55				919.5	919.4	0.0109
56				919.5	919.4	0.0109
57				919.5	919.4	0.0109
58				919.5	919.4	0.0109
59				919.5	919.4	0.0109
60				920	919.4	0.0653
61				920	919.4	0.0653
62				920	919.4	0.0653
63				920	919.4	0.0653
64				920	919.4	0.0653
65				920	919.4	0.0653
66				920.5	919.4	0.1196
67				920.5	919.4	0.1196
68				920.5	919.4	0.1196
69				920.5	919.4	0.1196
70				920.5	919.4	0.1196
71				921	919.4	0.1740
72				921	919.4	0.1740
73				921	919.4	0.1740
74				921	919.4	0.1740
75				921.5	919.4	0.2284
76				921.5	919.4	0.2284
77				921.5	919.4	0.2284
78				921.5	919.4	0.2284
79				922	919.4	0.2828
80				922	919.4	0.2828
Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)			4.8748			0.1169
Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)			0.9405			0.0766



Σχήμα Α'.5: Ομοιογενές μοντέλο με $Grid = 1$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης. Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης κατά την PSV-SYNTHETICS μέθοδο. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|-|$). Η λευκή οριζόντια γραμμή συμβολίζει την αναλυτική λύση σε ομοιογενές μέσο (919.4 m/s).

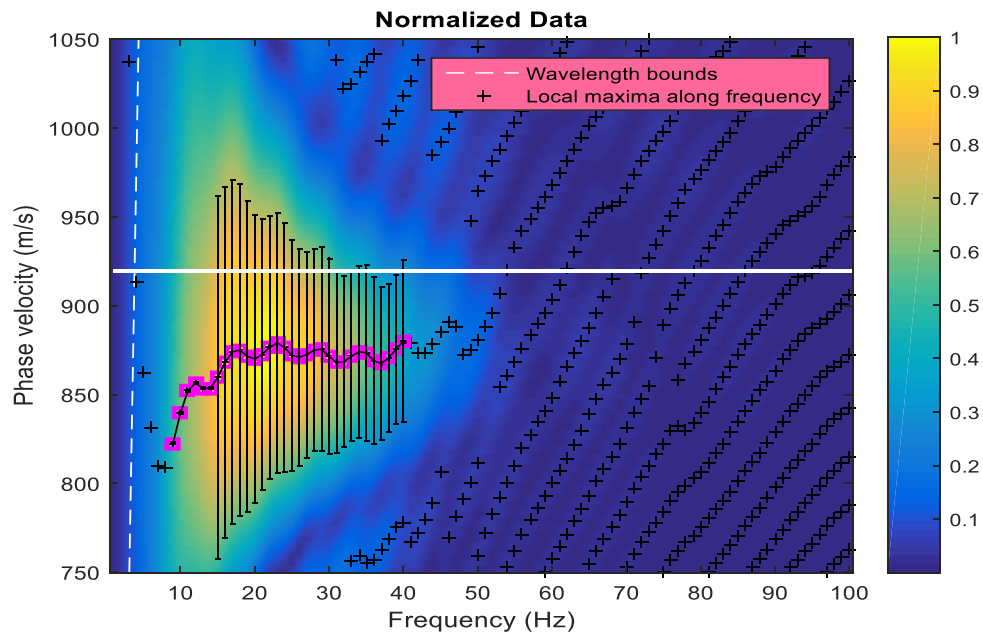


Σχήμα Α'.6: Ομοιογενές μοντέλο με $Grid = 1$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης. Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης κατά την SW4 μέθοδο. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|-|$). Η λευκή οριζόντια γραμμή συμβολίζει την αναλυτική λύση σε ομοιογενές μέσο (919.4 m/s).

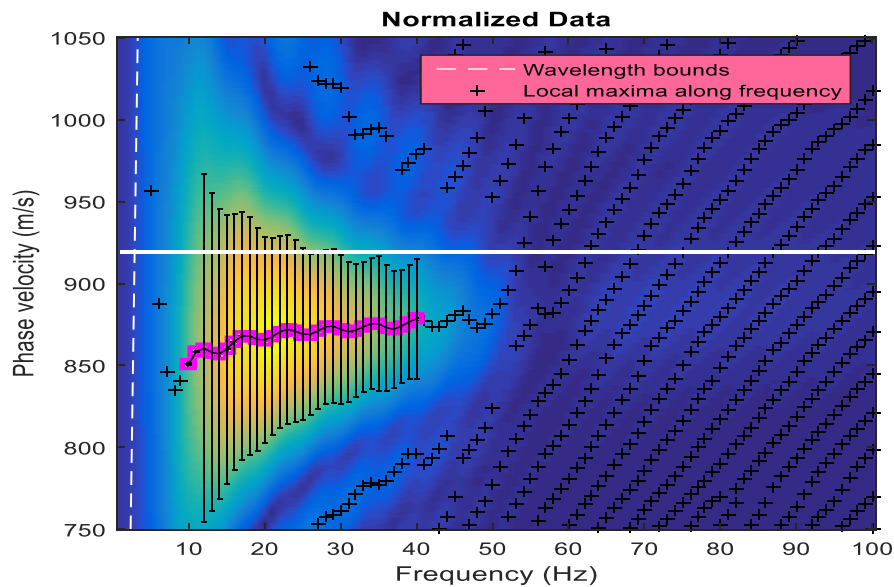
Πίνακας Α'.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής (DCcalc) και υπολογισμένης λύσης (DCobs) του ομοιογενούς μοντέλου με Grid = 1 m και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης κατά την PSV – SYNTHETICS και SW4 μέθοδο. Υπολογισμός μέσης (Average) και τυπικής απόκλισης (STDEV) ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος.

Συχνότητα (Hz)	PSV – SYNTHETICS			SW4		
	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR
10	851	919.4	7.4396			
11	858.5	919.4	6.6239			
12	860.5	919.4	6.4064			
13	858	919.4	6.6783			
14	857	919.4	6.7870			
15	860	919.4	6.4607			
16	864.5	919.4	5.9713			
17	868	919.4	5.5906			
18	868	919.4	5.5906			
19	866	919.4	5.8081			
20	865.5	919.4	5.8625			
21	867.5	919.4	5.6450			
22	870.5	919.4	5.3187			
23	872	919.4	5.1555			
24	871	919.4	5.2643			
25	869	919.4	5.4818			
26	869	919.4	5.4818			
27	871	919.4	5.2643			
28	873.5	919.4	4.9924			
29	874	919.4	4.9380			
30	872	919.4	5.1555	918.5	919.4	0.0979
31	870.5	919.4	5.3187	918.5	919.4	0.0979
32	871.5	919.4	5.2099	918.5	919.4	0.0979
33	873.5	919.4	4.9924	918.5	919.4	0.0979
34	875.5	919.4	4.7749	918.5	919.4	0.0979
35	875.5	919.4	4.7749	919	919.4	0.0435
36	873	919.4	5.0468	919	919.4	0.0435
37	872	919.4	5.1555	919	919.4	0.0435
38	874	919.4	4.9380	919	919.4	0.0435
39	876.5	919.4	4.6661	919	919.4	0.0435
40	878.5	919.4	4.4486	919	919.4	0.0435
41				919.5	919.4	0.0109
42				919.5	919.4	0.0109
43				919.5	919.4	0.0109
44				919.5	919.4	0.0109
45				919.5	919.4	0.0109
46				919.5	919.4	0.0109
47				919.5	919.4	0.0109
48				919.5	919.4	0.0109

49				919.5	919.4	0.0109
50				919.5	919.4	0.0109
51				919.5	919.4	0.0109
52				919.5	919.4	0.0109
53				919.5	919.4	0.0109
54				920	919.4	0.0653
55				920	919.4	0.0653
56				920	919.4	0.0653
57				920	919.4	0.0653
58				920	919.4	0.0653
59				920	919.4	0.0653
60				920	919.4	0.0653
61				920	919.4	0.0653
62				920	919.4	0.0653
63				920	919.4	0.0653
64				920.5	919.4	0.1196
65				920.5	919.4	0.1196
66				920.5	919.4	0.1196
67				920.5	919.4	0.1196
68				920.5	919.4	0.1196
69				920.5	919.4	0.1196
70				920.5	919.4	0.1196
71				920.5	919.4	0.1196
72				920.5	919.4	0.1196
73				920.5	919.4	0.1196
74				921	919.4	0.1740
75				921	919.4	0.1740
76				921	919.4	0.1740
77				921	919.4	0.1740
78				921	919.4	0.1740
79				921	919.4	0.1740
80				921	919.4	0.1740
Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)			5.5239			0.0776
Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)			0.7096			0.0550



Σχήμα Α'.7: Ομοιογενές διορθωμένο μοντέλο με $Grid = 1\text{ m}$ και θέσεις δεκτών από τους 400 έως τους 640 κόμβους. Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης κατά την PSV-SYNTHETICS μέθοδο. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|-|$). Η λευκή οριζόντια γραμμή συμβολίζει την αναλυτική λύση σε ομοιογενές μέσο (919.4 m/s).

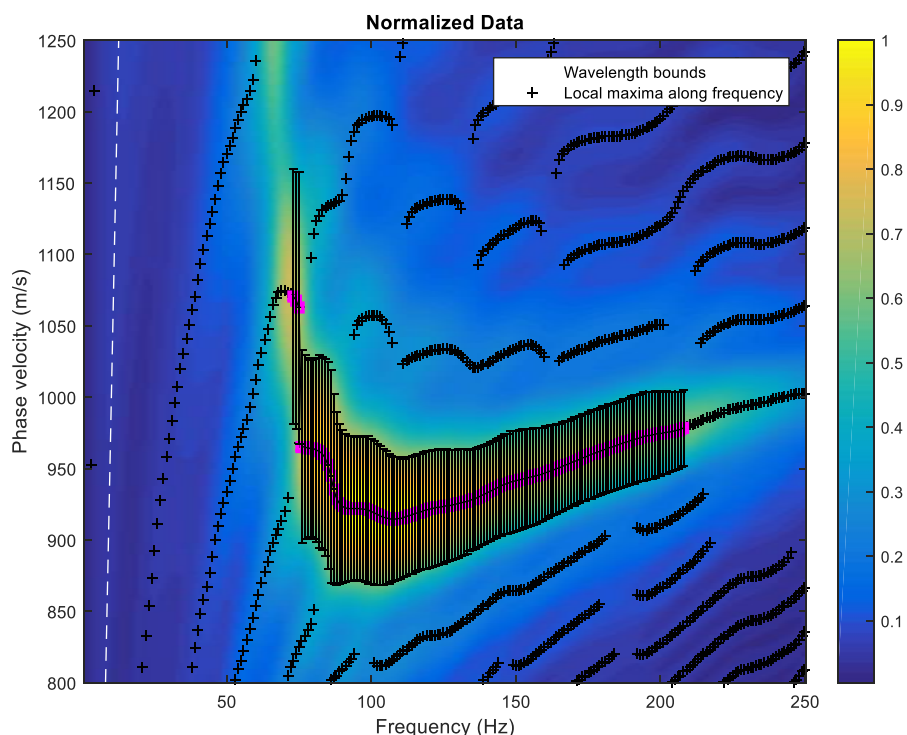


Σχήμα Α'.8: Ομοιογενές διορθωμένο μοντέλο με $Grid = 1\text{ m}$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης. Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης κατά την PSV-SYNTHETICS μέθοδο. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|-|$). Η λευκή οριζόντια γραμμή συμβολίζει την αναλυτική λύση σε ομοιογενές μέσο (919.4 m/s).

Πίνακας Α'.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής (DCcalc) και υπολογισμένης λύσης (DCobs) του ομοιογενούς μοντέλου με Grid = 1 m και θέσεις δεκτών από τους 400 έως τους 640 κόμβους και πλήρους δεξιάς κάλυψης κατά την PSV – SYNTHETICS μέθοδο. Υπολογισμός μέσης (Average) και τυπικής απόκλισης (STDEV) ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος.

Συχνότητα (Hz)	Θέσεις Δεκτών					
	400 έως 640 m ανά 1 m			Πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης		
	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR
10	839.5	919.4	8.6905	842.5	919.4	7.4396
11	852	919.4	7.2765	850	919.4	6.6239
12	856.5	919.4	6.8958	851.5	919.4	6.4064
13	853.5	919.4	7.1677	849	919.4	6.6783
14	853.5	919.4	7.1677	848.5	919.4	6.7870
15	859.5	919.4	6.4607	851.5	919.4	6.4607
16	868	919.4	5.5906	856	919.4	5.9713
17	874	919.4	4.9380	859.5	919.4	5.5906
18	875	919.4	4.8836	859.5	919.4	5.5906
19	871.5	919.4	5.2643	857.5	919.4	5.8081
20	870	919.4	5.3731	857	919.4	5.8625
21	872.5	919.4	5.0468	859	919.4	5.6450
22	876.5	919.4	4.6117	862	919.4	5.3187
23	879	919.4	4.3942	863.5	919.4	5.1555
24	876.5	919.4	4.6661	862.5	919.4	5.2643
25	872	919.4	5.1555	860.5	919.4	5.4818
26	871	919.4	5.2643	860.5	919.4	5.4818
27	872.5	919.4	5.0468	862.5	919.4	5.2643
28	875	919.4	4.7749	864.5	919.4	4.9924
29	875.5	919.4	4.8292	865	919.4	4.9380
30	871.5	919.4	5.2643	863.5	919.4	5.1555
31	868	919.4	5.5906	861.5	919.4	5.3187
32	868.5	919.4	5.5362	862.5	919.4	5.2099
33	871.5	919.4	5.2099	865	919.4	4.9924
34	874	919.4	4.9380	867	919.4	4.7749
35	873.5	919.4	5.0468	866.5	919.4	4.7749
36	869	919.4	5.5362	864	919.4	5.0468
37	867.5	919.4	5.6450	863	919.4	5.1555
38	870.5	919.4	5.2643	865	919.4	4.9380
39	875.5	919.4	4.7205	868	919.4	4.6661
40	880	919.4	4.2854	869.5	919.4	4.4486
Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)			5.5011			5.5239
Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)			0.9940			0.7096

Παράρτημα Β'



Σχήμα Β'.1: Πρώτο στρωματωμένο μοντέλο με $Grid = 0.25\text{ m}$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης. Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης κατά την PSV-SYNTHETICS μέθοδο. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|-|$).

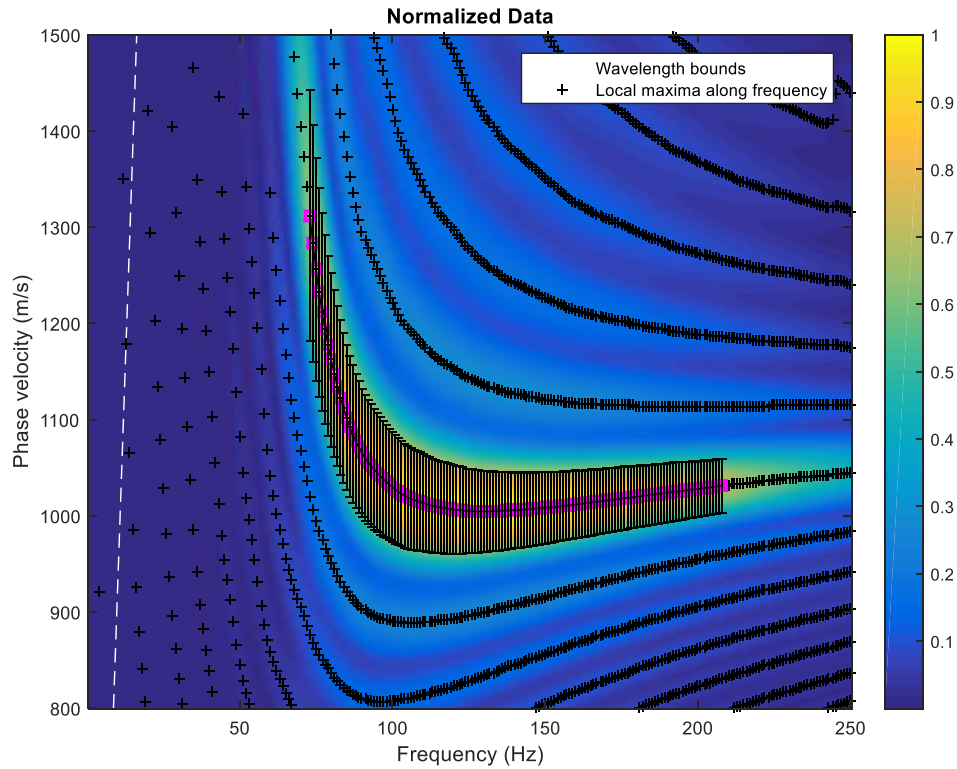
Πίνακας Β'.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής (DCcalc) και υπολογισμένης λύσης (DCobs) του πρώτου στρωματωμένου μοντέλου με $Grid = 0.25$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης κατά την PSV – SYNTHETICS μέθοδο. Υπολογισμός μέσης (Average) και τυπικής απόκλισης (STDEV) ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος.

Συχνότητα (Hz)	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR
73	1070.5	1248.777	14.276
74	1068	1223.084	12.680
75	1062.5	1200.403	11.488
76	965.5	1180.336	18.201
77	965	1162.529	16.991
78	964.5	1146.675	15.887
79	964	1132.513	14.880
80	964	1119.82	13.915
81	963	1108.409	13.119
82	962	1098.12	12.396
83	960.5	1088.817	11.785

84	957.5	1080.385	11.374
85	952.5	1072.724	11.207
86	944.5	1065.751	11.377
87	935.5	1059.39	11.694
88	929	1053.58	11.824
89	925.5	1048.263	11.711
90	923.5	1043.393	11.491
91	922.5	1038.925	11.206
92	922	1034.824	10.903
93	922	1031.055	10.577
94	922	1027.59	10.275
95	922	1024.403	9.996
96	922	1021.469	9.738
97	921.5	1018.768	9.548
98	921.5	1016.281	9.326
99	921	1013.991	9.171
100	920	1011.884	9.080
101	919	1009.945	9.005
102	918	1008.161	8.943
103	917	1006.522	8.894
104	916	1005.016	8.857
105	915.5	1003.635	8.782
106	915	1002.369	8.716
107	914.5	1001.212	8.661
108	914.5	1000.154	8.564
109	915	999.19	8.426
110	915	998.314	8.345
111	915.5	997.519	8.222
112	916.5	996.801	8.056
113	917	996.155	7.946
114	917.5	995.576	7.842
115	918.5	995.059	7.694
116	919	994.602	7.601
117	919.5	994.2	7.514
118	920.5	993.85	7.380
119	921	993.549	7.302
120	921.5	993.294	7.228
121	922	993.083	7.158
122	922.5	992.912	7.091
123	923	992.779	7.029
124	923	992.682	7.020
125	923.5	992.62	6.963
126	924	992.589	6.910

127	924	992.589	6.910
128	924.5	992.617	6.862
129	925	992.672	6.817
130	925.5	992.752	6.774
131	926	992.856	6.734
132	926.5	992.982	6.695
133	927	993.13	6.659
134	927.5	993.297	6.624
135	928.5	993.484	6.541
136	929	993.688	6.510
137	930	993.909	6.430
138	931	994.146	6.352
139	932	994.397	6.275
140	933	994.663	6.199
141	934	994.942	6.125
142	935	995.233	6.052
143	936	995.536	5.980
144	937	995.85	5.910
145	938	996.174	5.840
146	939	996.508	5.771
147	939.5	996.851	5.753
148	940.5	997.203	5.686
149	941	997.563	5.670
150	941.5	997.93	5.655
151	942	998.304	5.640
152	942.5	998.685	5.626
153	943	999.072	5.612
154	943.5	999.465	5.599
155	944	999.863	5.587
156	944.5	1000.266	5.575
157	945	1000.674	5.564
158	945.5	1001.086	5.553
159	946	1001.501	5.542
160	947	1001.921	5.482
161	947.5	1002.344	5.472
162	948.5	1002.769	5.412
163	949	1003.198	5.403
164	950	1003.629	5.344
165	950.5	1004.062	5.335
166	951.5	1004.498	5.276
167	952.5	1004.935	5.218
168	953	1005.374	5.209
169	954	1005.814	5.151

170	955	1006.255	5.094
171	955.5	1006.698	5.086
172	956.5	1007.141	5.028
173	957.5	1007.585	4.971
174	958	1008.029	4.963
175	959	1008.474	4.906
176	960	1008.919	4.849
177	960.5	1009.364	4.841
178	961.5	1009.809	4.784
179	962	1010.254	4.776
180	963	1010.699	4.719
181	963.5	1011.143	4.712
182	964.5	1011.586	4.655
183	965	1012.029	4.647
184	965.5	1012.471	4.639
185	966.5	1012.912	4.582
186	967	1013.352	4.574
187	968	1013.791	4.517
188	968.5	1014.229	4.509
189	969	1014.666	4.501
190	970	1015.101	4.443
191	970.5	1015.535	4.435
192	971	1015.968	4.426
193	971.5	1016.399	4.417
194	972.5	1016.829	4.360
195	973	1017.256	4.351
196	973	1017.682	4.391
197	973.5	1018.107	4.381
198	974	1018.529	4.372
199	974.5	1018.95	4.362
200	974.5	1019.368	4.402
201	975	1019.785	4.392
202	975.5	1020.199	4.381
203	975.5	1020.612	4.420
204	976	1021.022	4.410
205	976.5	1021.43	4.399
206	977	1021.836	4.388
207	977.5	1022.24	4.377
208	978.5	1022.641	4.316
Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)			7.173
Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)			2.944



Σχήμα Β'.2: Πρώτο στρωματωμένο μοντέλο με $Grid = 0.25\text{ m}$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης. Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης κατά την SW4 μέθοδο. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|-|$).

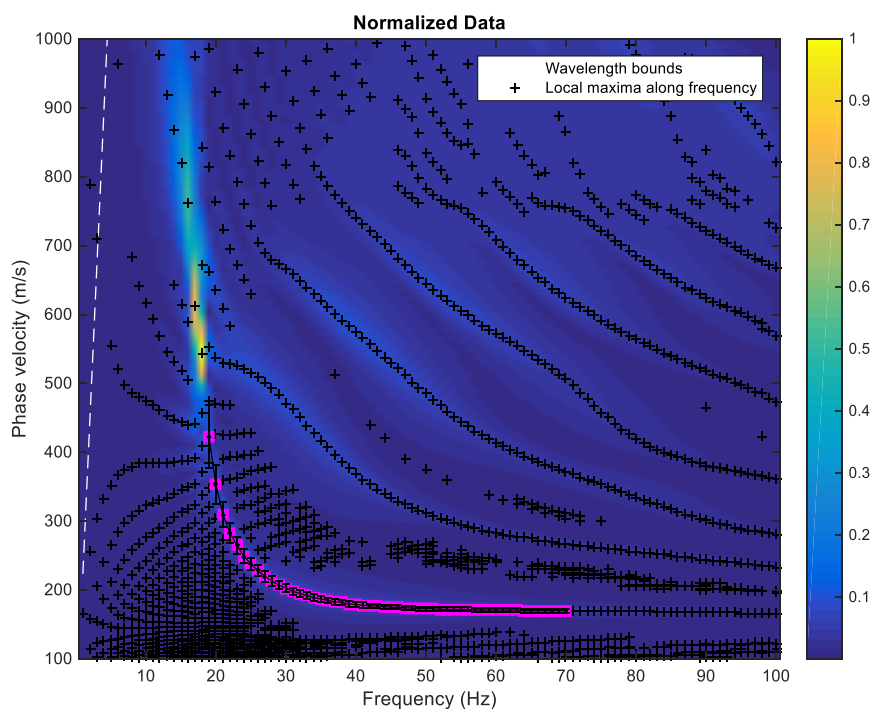
Πίνακας Β'.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής (DCcalc) και υπολογισμένης λύσης (DCobs) του πρώτου στρωματωμένου μοντέλου με $Grid = 0.25$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης κατά την SW4 μέθοδο. Υπολογισμός μέσης (Average) και τυπικής απόκλισης (STDEV) ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος.

Συχνότητα (Hz)	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR
73	1312	1248.777	5.063
74	1283	1223.084	4.899
75	1256.5	1200.403	4.673
76	1232.5	1180.336	4.419
77	1212	1162.529	4.255
78	1193.5	1146.675	4.084
79	1177	1132.513	3.928
80	1162	1119.82	3.767
81	1148	1108.409	3.572
82	1135	1098.12	3.358
83	1123	1088.817	3.139
84	1112	1080.385	2.926
85	1102	1072.724	2.729
86	1093	1065.751	2.557

87	1085	1059.39	2.417
88	1077.5	1053.58	2.270
89	1071.5	1048.263	2.217
90	1065.5	1043.393	2.119
91	1060.5	1038.925	2.077
92	1056	1034.824	2.046
93	1052	1031.055	2.031
94	1048.5	1027.59	2.035
95	1045	1024.403	2.011
96	1041.5	1021.469	1.961
97	1038.5	1018.768	1.937
98	1035.5	1016.281	1.891
99	1032.5	1013.991	1.825
100	1030	1011.884	1.790
101	1027.5	1009.945	1.738
102	1025	1008.161	1.670
103	1023	1006.522	1.637
104	1021	1005.016	1.590
105	1019.5	1003.635	1.581
106	1018	1002.369	1.559
107	1016.5	1001.212	1.527
108	1015.5	1000.154	1.534
109	1014.5	999.19	1.532
110	1013.5	998.314	1.521
111	1012.5	997.519	1.502
112	1011.5	996.801	1.475
113	1010.5	996.155	1.440
114	1010	995.576	1.449
115	1009	995.059	1.401
116	1008.5	994.602	1.397
117	1008	994.2	1.388
118	1007.5	993.85	1.373
119	1007	993.549	1.354
120	1006.5	993.294	1.330
121	1006	993.083	1.301
122	1006	992.912	1.318
123	1005.5	992.779	1.281
124	1005	992.682	1.241
125	1005	992.62	1.247
126	1005	992.589	1.250
127	1004.5	992.589	1.200
128	1004.5	992.617	1.197
129	1004.5	992.672	1.192

130	1004.5	992.752	1.183
131	1004.5	992.856	1.173
132	1004.5	992.982	1.160
133	1005	993.13	1.195
134	1005	993.297	1.178
135	1005	993.484	1.159
136	1005	993.688	1.138
137	1005.5	993.909	1.166
138	1005.5	994.146	1.142
139	1005.5	994.397	1.117
140	1006	994.663	1.140
141	1006	994.942	1.111
142	1006	995.233	1.082
143	1006.5	995.536	1.101
144	1006.5	995.85	1.069
145	1007	996.174	1.087
146	1007	996.508	1.053
147	1007.5	996.851	1.068
148	1008	997.203	1.083
149	1008	997.563	1.046
150	1008.5	997.93	1.059
151	1008.5	998.304	1.021
152	1009	998.685	1.033
153	1009	999.072	0.994
154	1009.5	999.465	1.004
155	1010	999.863	1.014
156	1010.5	1000.266	1.023
157	1010.5	1000.674	0.982
158	1011	1001.086	0.990
159	1011.5	1001.501	0.998
160	1012	1001.921	1.006
161	1012	1002.344	0.963
162	1012.5	1002.769	0.970
163	1013	1003.198	0.977
164	1013.5	1003.629	0.984
165	1014	1004.062	0.990
166	1014.5	1004.498	0.996
167	1014.5	1004.935	0.952
168	1015	1005.374	0.957
169	1015.5	1005.814	0.963
170	1016	1006.255	0.968
171	1016.5	1006.698	0.974
172	1016.5	1007.141	0.929

173	1017	1007.585	0.934
174	1017.5	1008.029	0.940
175	1018	1008.474	0.945
176	1018.5	1008.919	0.950
177	1018.5	1009.364	0.905
178	1019	1009.809	0.910
179	1019.5	1010.254	0.915
180	1020	1010.699	0.920
181	1020.5	1011.143	0.925
182	1020.5	1011.586	0.881
183	1021	1012.029	0.886
184	1021.5	1012.471	0.892
185	1022	1012.912	0.897
186	1022.5	1013.352	0.903
187	1023	1013.791	0.908
188	1023	1014.229	0.865
189	1023.5	1014.666	0.871
190	1024	1015.101	0.877
191	1024.5	1015.535	0.883
192	1025	1015.968	0.889
193	1025.5	1016.399	0.895
194	1025.5	1016.829	0.853
195	1026	1017.256	0.860
196	1026.5	1017.682	0.866
197	1027	1018.107	0.873
198	1027.5	1018.529	0.881
199	1027.5	1018.95	0.839
200	1028	1019.368	0.847
201	1028.5	1019.785	0.855
202	1029	1020.199	0.863
203	1029	1020.612	0.822
204	1029.5	1021.022	0.830
205	1030	1021.43	0.839
206	1030.5	1021.836	0.848
207	1031	1022.24	0.857
208	1031	1022.641	0.817
Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)			1.472
Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)			0.908

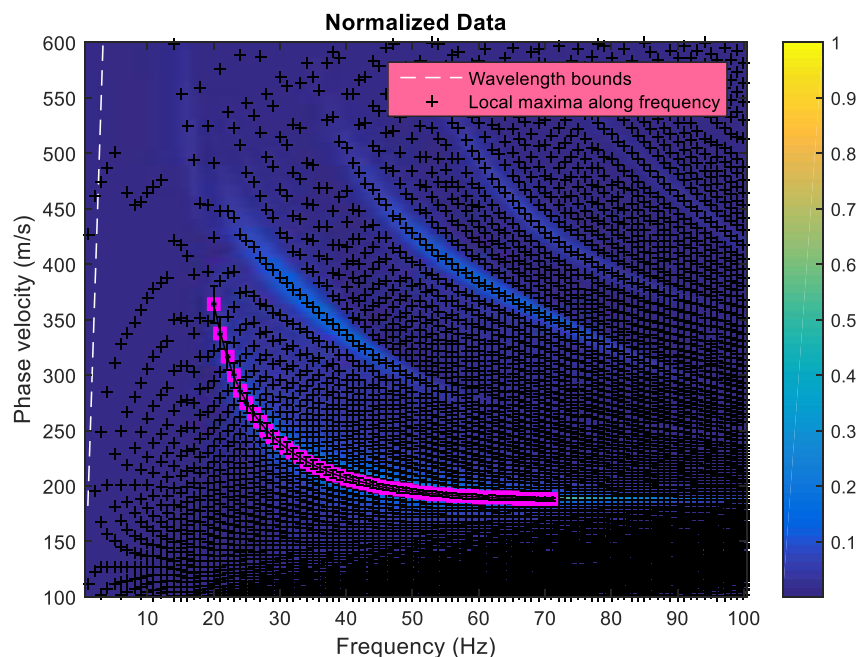


Σχήμα Β'.3: Δεύτερο στρωματωμένο μοντέλο με $Grid = 0.25\text{ m}$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης. Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης κατά την PSV-SYNTHETICS μέθοδο. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|-|$).

Πίνακας Β'.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής (DCcalc) και υπολογισμένης λύσης (DCobs) του δεύτερου στρωματωμένου μοντέλου με $Grid = 0.25$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης κατά την PSV – SYNTHETICS μέθοδο. Υπολογισμός μέσης (Average) και τυπικής απόκλισης (STDEV) ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος.

Συχνότητα (Hz)	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR
19	423	395.378	6.986
20	353	363.314	2.839
21	310	337.175	8.060
22	283	316.218	10.505
23	265	299.329	11.469
24	249	285.533	12.795
25	238	274.088	13.167
26	228	264.449	13.783
27	220	256.22	14.136
28	213	249.113	14.497
29	207	242.912	14.784
30	203	237.457	14.511
31	198	232.624	14.884

32	195	228.319	14.593
33	192	224.466	14.464
34	189	221.005	14.482
35	187	217.887	14.176
36	185	215.071	13.982
37	183	212.523	13.892
38	182	210.214	13.422
39	180	208.118	13.511
40	179	206.213	13.197
41	178	204.479	12.949
42	177	202.9	12.765
43	177	201.46	12.141
44	176	200.146	12.064
45	175	198.945	12.036
46	175	197.846	11.547
47	174	196.84	11.603
48	174	195.918	11.187
49	173	195.072	11.315
50	173	194.294	10.960
51	173	193.58	10.631
52	172	192.922	10.845
53	172	192.316	10.564
54	172	191.758	10.304
55	172	191.242	10.062
56	172	190.765	9.837
57	171	190.325	10.154
58	171	189.917	9.961
59	171	189.54	9.782
60	171	189.19	9.615
61	171	188.865	9.459
62	171	188.563	9.314
63	171	188.283	9.179
64	170	188.022	9.585
65	170	187.78	9.469
66	170	187.554	9.359
67	170	187.344	9.258
68	170	187.147	9.162
69	170	186.964	9.073
70	170	186.793	8.990
Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)			11.371
Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)			2.404



Σχήμα Β'.4: Δεύτερο στρωματωμένο μοντέλο με $Grid = 0.25\text{ m}$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης. Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης κατά την SW4 μέθοδο. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|-|$).

Πίνακας Β'.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής (DCcalc) και υπολογισμένης λύσης (DCobs) του δεύτερου στρωματωμένου μοντέλου με $Grid = 0.25$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης κατά την SW4 μέθοδο. Υπολογισμός μέσης (Average) και τυπικής απόκλισης (STDEV) ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος.

Συχνότητα (Hz)	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR
20	363.5	363.314	0.051
21	338	337.175	0.245
22	317	316.218	0.247
23	299.5	299.329	0.057
24	286	285.533	0.164
25	275	274.088	0.333
26	265	264.449	0.208
27	257.5	256.22	0.500
28	250	249.113	0.356
29	244	242.912	0.448
30	238.5	237.457	0.439
31	234	232.624	0.592
32	229.5	228.319	0.517
33	225.5	224.466	0.461
34	222	221.005	0.450
35	219	217.887	0.511

36	216	215.071	0.432
37	213.5	212.523	0.460
38	211	210.214	0.374
39	209	208.118	0.424
40	207	206.213	0.382
41	205.5	204.479	0.499
42	204	202.9	0.542
43	202.5	201.46	0.516
44	201	200.146	0.427
45	199.5	198.945	0.279
46	198.5	197.846	0.331
47	197.5	196.84	0.335
48	196.5	195.918	0.297
49	196	195.072	0.476
50	195	194.294	0.363
51	194.5	193.58	0.475
52	193.5	192.922	0.300
53	193	192.316	0.356
54	192.5	191.758	0.387
55	192	191.242	0.396
56	191.5	190.765	0.385
57	191	190.325	0.355
58	190.5	189.917	0.307
59	190.5	189.54	0.506
60	190	189.19	0.428
61	189.5	188.865	0.336
62	189.5	188.563	0.497
63	189	188.283	0.381
64	189	188.022	0.520
65	189	187.78	0.650
66	188.5	187.554	0.504
67	188.5	187.344	0.617
68	188.5	187.147	0.723
69	188	186.964	0.554
70	188	186.793	0.646
Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)			0.413
Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)			0.136

Πίνακας Β'.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής (DCcalc) και υπολογισμένης λύσης (DCobs) του τρίτου στρωματωμένου μοντέλου με Grid = 0.25 και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης κατά την PSV – SYNTHETICS μέθοδο. Υπολογισμός μέσης (Average) και τυπικής απόκλισης (STDEV) ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος.

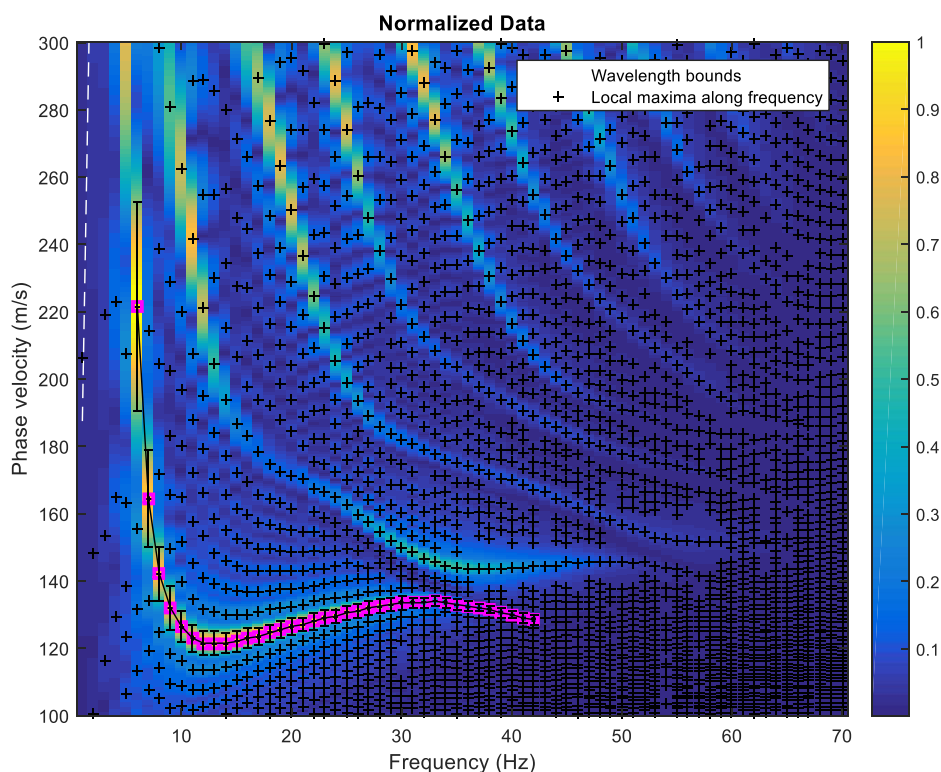
Συχνότητα (Hz)	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR
25	381.5	363.48	4.9576
26	362.5	355.891	1.8570
27	344.5	349.64	1.4701
28	331	344.471	3.9106
29	320.5	340.173	5.7832
30	311.5	336.575	7.4500
31	305.5	333.546	8.4084
32	300.5	330.978	9.2085
33	296.5	328.791	9.8211
34	293	326.916	10.3745
35	290.5	325.303	10.6986
36	288.5	323.908	10.9315
37	287	322.697	11.0621
38	285.5	321.641	11.2364
39	284.5	320.719	11.2931
40	283.5	319.909	11.3810
41	283	319.197	11.3400
42	282.5	318.569	11.3222
43	282	318.014	11.3247
44	281.5	317.522	11.3447
45	281.5	317.085	11.2225
46	281	316.696	11.2714
47	281	316.349	11.1741
48	281	316.039	11.0869
49	281	315.763	11.0092
50	281	315.515	10.9393
51	281	315.292	10.8763
52	281	315.092	10.8197
53	281	314.913	10.7690
54	281.5	314.751	10.5642
55	281.5	314.606	10.5230
56	281.5	314.474	10.4854
57	281.5	314.355	10.4516
58	282	314.248	10.2620
59	282	314.151	10.2343
60	282	314.064	10.2094
61	282.5	313.984	10.0273
62	282.5	313.912	10.0066
63	282.5	313.847	9.9880

64	283	313.787	9.8114
65	283	313.734	9.7962
66	283.5	313.685	9.6227
67	283.5	313.64	9.6097
68	283.5	313.6	9.5982
69	284	313.563	9.4281
70	284	313.53	9.4186
71	284	313.499	9.4096
72	284.5	313.471	9.2420
73	284.5	313.446	9.2348
74	285	313.423	9.0686
75	285	313.402	9.0625
76	285	313.383	9.0570
77	285.5	313.365	8.8922
78	285.5	313.35	8.8878
79	285.5	313.335	8.8835
80	286	313.322	8.7201
Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)			9.5361
Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)			2.1329

Πίνακας Β'.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής (DCcalc) και υπολογισμένης λύσης (DCobs) του τρίτου στρωματωμένου μοντέλου με Grid = 0.25 και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης κατά την SW4 μέθοδο. Υπολογισμός μέσης (Average) και τυπικής απόκλισης (STDEV) ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος.

Συχνότητα (Hz)	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR
25	461	454.125	1.5139
26	452	445.643	1.4265
27	442.5	435.954	1.5015
28	432	425.382	1.5558
29	420.5	414.436	1.4632
30	409	403.671	1.3201
31	398.5	393.54	1.2604
32	388.5	384.316	1.0887
33	379.5	376.101	0.9037
34	372	368.885	0.8444
35	365	362.59	0.6647
36	359	357.115	0.5278
37	354	352.352	0.4677
38	349.5	348.203	0.3725
39	346	344.579	0.4124
40	342.5	341.405	0.3207

41	339.5	338.615	0.2614
42	337	336.155	0.2514
43	335	333.978	0.3060
44	333	332.047	0.2870
45	331	330.328	0.2034
46	329.5	328.794	0.2147
47	328	327.42	0.1771
48	327	326.188	0.2489
49	325.5	325.08	0.1292
50	324.5	324.081	0.1293
51	323.5	323.179	0.0993
52	323	322.362	0.1979
53	322	321.622	0.1175
54	321.5	320.949	0.1717
55	321	320.337	0.2070
56	320.5	319.78	0.2252
57	320	319.271	0.2283
58	319.5	318.807	0.2174
59	319	318.382	0.1941
60	318.5	317.992	0.1598
61	318	317.635	0.1149
62	318	317.307	0.2184
63	317.5	317.006	0.1558
64	317.5	316.729	0.2434
65	317	316.473	0.1665
66	317	316.238	0.2410
67	316.5	316.021	0.1516
68	316.5	315.821	0.2150
69	316.5	315.636	0.2737
70	316	315.465	0.1696
71	316	315.306	0.2201
72	316	315.16	0.2665
73	316	315.024	0.3098
74	315.5	314.899	0.1909
75	315.5	314.782	0.2281
76	315.5	314.674	0.2625
77	315.5	314.573	0.2947
78	315.5	314.48	0.3243
79	315.5	314.393	0.3521
80	315	314.312	0.2189
Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)			0.4304
Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)			0.4237

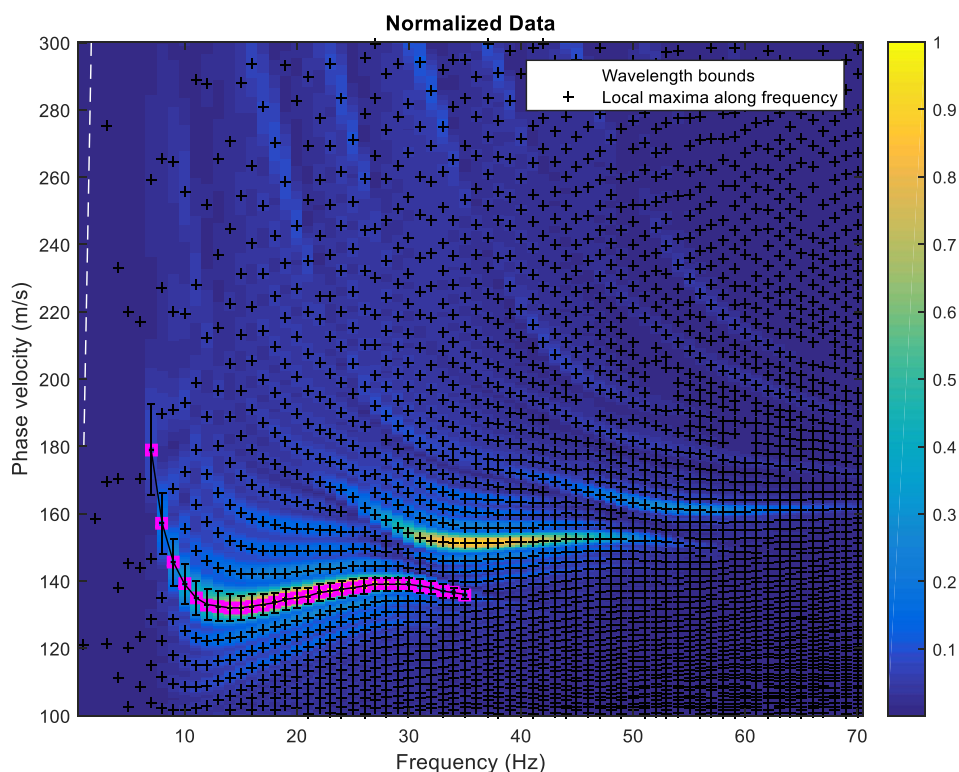


Σχήμα Β'.5: Τέταρτο στρωματωμένο μοντέλο με $Grid = 0.25\text{ m}$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης. Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης κατά την PSV-SYNTHETICS μέθοδο. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|-|$).

Πίνακας Β'.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής (DCcalc) και υπολογισμένης λύσης (DCobs) του τέταρτου στρωματωμένου μοντέλου με $Grid = 0.25$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης κατά την PSV – SYNTHETICS μέθοδο. Υπολογισμός μέσης (Average) και τυπικής απόκλισης (STDEV) ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος.

Συχνότητα (Hz)	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR
6	221.5	191.297	15.789
7	164.5	163.169	0.816
8	142	149.833	5.228
9	132	142.504	7.371
10	126.5	138.262	8.507
11	123	135.831	9.446
12	121.5	134.523	9.681
13	121.5	133.926	9.278
14	121.5	133.788	9.185
15	122	133.945	8.918
16	123	134.291	8.408

17	123.5	134.755	8.352
18	124.5	135.285	7.972
19	125.5	135.846	7.616
20	126.5	136.411	7.266
21	127	136.956	7.269
22	128	137.462	6.883
23	129	137.912	6.462
24	129.5	138.284	6.352
25	130.5	138.559	5.816
26	131	138.715	5.562
27	132	138.727	4.849
28	132.5	138.578	4.386
29	133	138.259	3.804
30	133.5	137.778	3.105
31	133.5	137.163	2.671
32	133.5	136.451	2.163
33	134	135.683	1.240
34	133.5	134.895	1.034
35	133	134.112	0.829
36	132.5	133.352	0.639
37	132	132.627	0.473
38	131.5	131.941	0.334
39	130.5	131.296	0.606
40	130	130.694	0.531
41	129	130.132	0.870
42	128.5	129.608	0.855
Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)			4.970
Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)			3.295



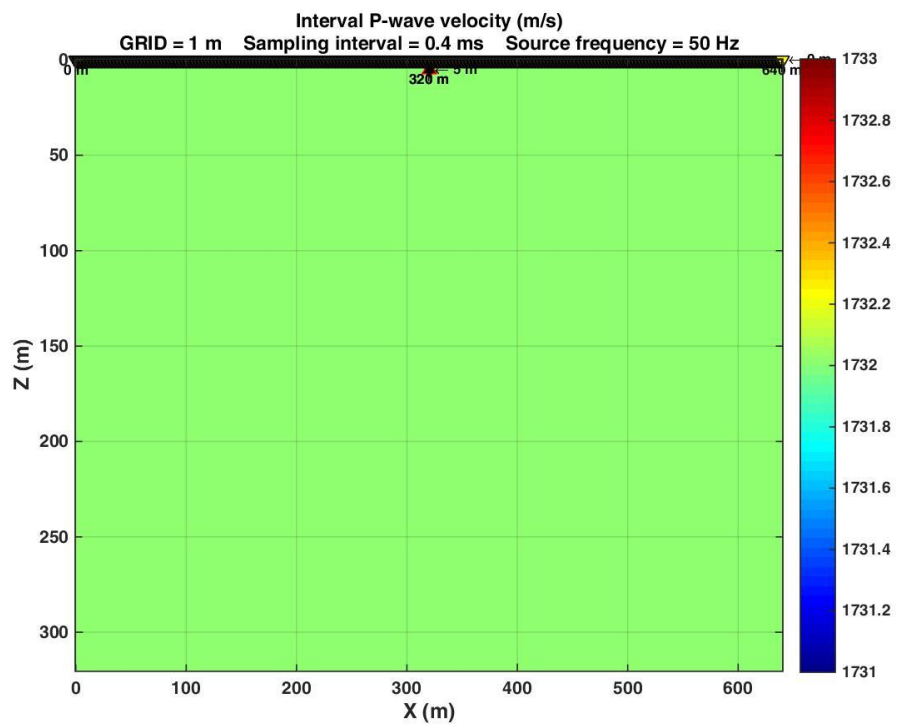
Σχήμα Β'.6: Τέταρτο στρωματωμένο μοντέλο με $Grid = 0.25\text{ m}$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης. Απεικόνιση της κατανομής της κανονικοποιημένης σεισμικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα τη συχνότητα και κατακόρυφο την ταχύτητα φάσης κατά την SW4 μέθοδο. Η επιλεγμένη καμπύλη διασποράς οριοθετείται με τα τετράγωνα. Έχει πραγματοποιηθεί για κάθε μέτρηση η εκτίμηση της διακύμανσης (σύμβολο: $|-|$).

Πίνακας Β'.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλυτικής (DCcalc) και υπολογισμένης λύσης (DCobs) του τέταρτου στρωματωμένου μοντέλου με $Grid = 0.25$ και θέσεις δεκτών πλήρους δεξιάς από την πηγή κάλυψης κατά την SW4 μέθοδο. Υπολογισμός μέσης (Average) και τυπικής απόκλισης (STDEV) ποσοστιαίου απόλυτου σφάλματος.

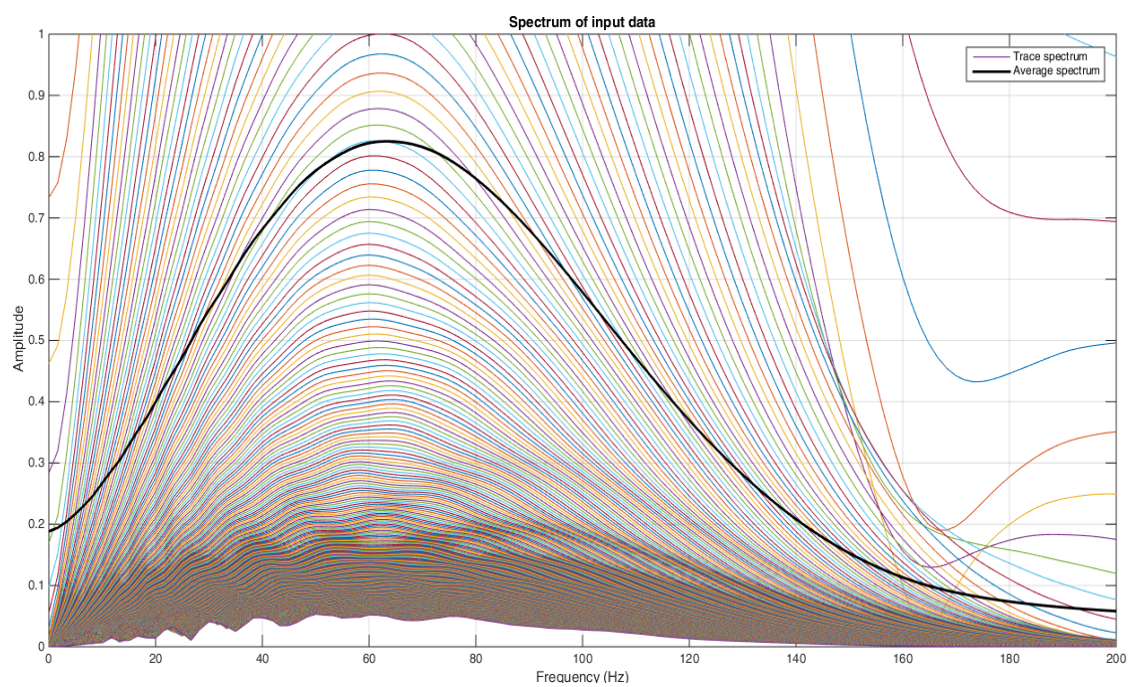
Συχνότητα (Hz)	DCobs	DCcalc	% ABS ERROR
9	145.5	142.443	2.146
10	139	136.876	1.552
11	135	133.683	0.985
12	133	131.936	0.806
13	132.5	131.088	1.077
14	132	130.807	0.912
15	132	130.889	0.849
16	132.5	131.204	0.988
17	133	131.666	1.013
18	133.5	132.219	0.969
19	134.5	132.824	1.262
20	135	133.452	1.160
21	135.5	134.081	1.058

22	136.5	134.694	1.341
23	137	135.276	1.274
24	137.5	135.814	1.241
25	138	136.291	1.254
26	138.5	136.693	1.322
27	139	136.998	1.461
28	139	137.184	1.324
29	139	137.228	1.291
30	139	137.109	1.379
31	138.5	136.82	1.228
32	138	136.37	1.195
33	137	135.792	0.890
34	136.5	135.126	1.017
35	136	134.413	1.181
Μέση τιμή απόλυτων σφαλμάτων (%)			1.410
Τυπική απόκλιση απόλυτων σφαλμάτων (%)			0.886

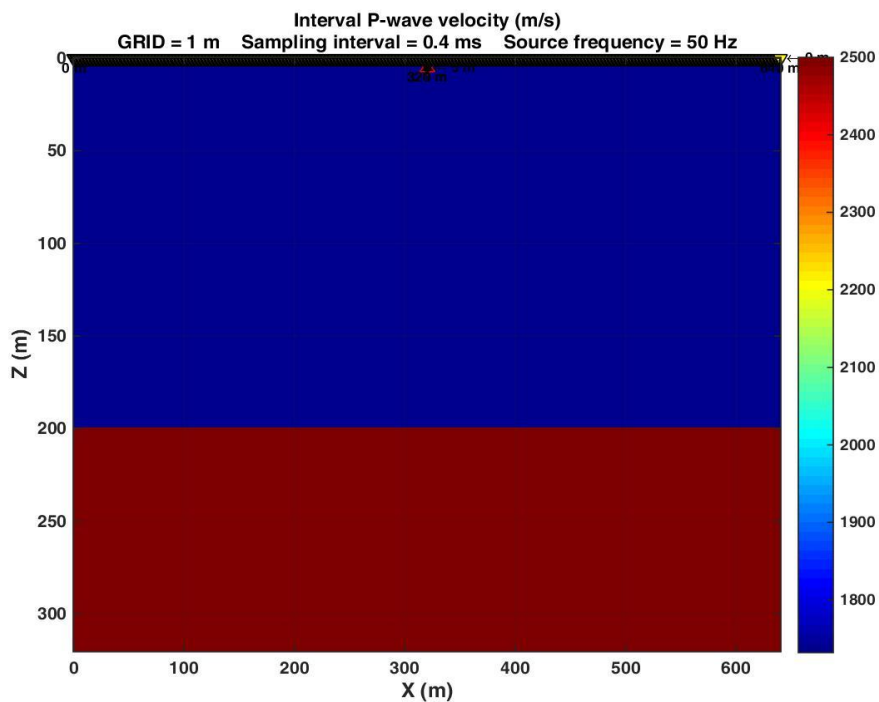
Παράρτημα Γ'



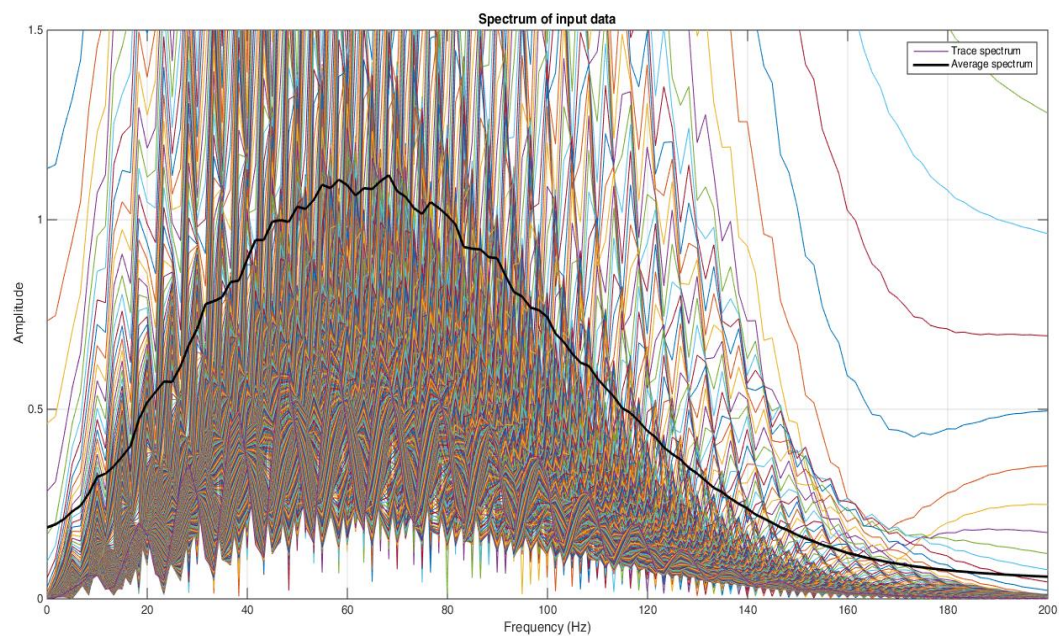
Σχήμα Γ'.1: Ομοιογενές μοντέλο με θέση πηγής $(X, Z) = (320 \text{ m}, 5 \text{ m})$ και δέκτες $(X, Z) = (1 : 640, 0)$.



Σχήμα Γ'.2: Συχνοτικό φάσμα ομοιογενούς μοντέλου με απορροφητικά όρια στην επιφάνεια. Οριζόντιος άξονας συχνότητα και κατακόρυφος πλάτος.



Σχήμα Γ'3: Στρωματωμένο μοντέλο με θέση πηγής $(X, Z) = (320 \text{ m}, 5 \text{ m})$ και δέκτες $(X, Z) = (1 : 640, 0)$. Το πρώτο στρώμα έχει πάχος 200 m και το δεύτερο 120 m.



Σχήμα Γ'4: Συχνοτικό φάσμα στρωματωμένου μοντέλου με απορροφητικά όρια στην επιφάνεια. Οριζόντιος άξονας συχνότητα και κατακόρυφος πλάτος.

Παράρτημα Δ'

Ακολουθούν ενδεικτικά οι εντολές για την έναρξη προσωμοίωσης με την SW4 μέθοδο για το ομοιογενές μοντέλο και τα αντίστοιχα αρχεία εισόδου για τον αλγόριθμο SW4 (*.in) για κάθε μοντέλο.

```
export PATH=${PATH}:/usr/lib64/mpich/bin  
cd /home/gkritik/SW4/sw4-v2.01/optimize/  
mpirun -np 4 ./sw4 /home/matlab/guest/SW4/HomoG1/HomoG1.in
```

Ακολουθούν τα αρχεία εισόδου για τον αλγόριθμο SW4 (*.in)

Οι καταχωρήσεις που έπονται από το σύμβολο της δέσης (#) θεωρούνται ως σχόλια από τον αλγόριθμο SW4.

Πρώτο ομοιογενές μοντέλο

```
# This is an SW4 input file for the first Homogeneous model  
# First we set up a grid with a spacing h (=1-> 8  
# points/minwavelength)  
# The material properties are given by the  
# block commands.  
# The solution is recorded at different locations  
# and saved in different usgs-files  
# A single moment 50z line source is used with  
# the time dependency being the RickerInt function  
grid h=1 nx=640 ny=70 nz=320  
time t=0.5  
#specify the width of the super grid damping layer (30 is the default)  
#supergrid gp=30  
# first define the material properties everywhere (half-space)  
block vp=1732 vs=1000 rho=2000  
# Ricker time function gives the velocities directly  
# t0 = 13.5/omega =0.043 < 0.05 avoids (most) startup transients
```

```

source x=320 y=35 z=0 mxx=1e15 myy=1e15 mzz=1e15 t0=0.1 freq=50 type=RickerInt
# Note that all recording stations are relative to the (0,0,0) origin
rec x=30.00 y=35.00 z=0.00 file=Line_001_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=31.00 y=35.00 z=0.00 file=Line_002_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=32.00 y=35.00 z=0.00 file=Line_003_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
      •
      •
      •
rec x=609.00 y=35.00 z=0.00 file=Line_580_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=610.00 y=35.00 z=0.00 file=Line_581_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

fileio path=/home/matlab/guest/SW4/HomoG1/HomoG1_Results

```

Δεύτερο ομοιογενές μοντέλο

```

# This is an SW4 input file for the second Homogeneous model
# First we set up a grid with a spacing h (=1-> 8
# points/minwavelength)
# The material properties are given by the
# block commands.
# The solution is recorded at different locations
# and saved in different usgs-files
# A single moment 50z line source is used with
# the time dependency being the RickerInt function
grid h=1.25 nx=640 ny=70 nz=320
time t=0.5
#specify the width of the super grid damping layer (30 is the default)
#supergrid gp=30
# first define the material properties everywhere (half-space)
block vp=1732 vs=1000 rho=2000
# Ricker time function gives the velocities directly
# t0 = 13.5/omega =0.043 < 0.05 avoids (most) startup transients
source x=320 y=35 z=0 mxx=1e15 myy=1e15 mzz=1e15 t0=0.1 freq=50 type=RickerInt
# Note that all recording stations are relative to the (0,0,0) origin
rec x=0.00 y=35.00 z=0.00 file=Line_001_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=1.25 y=35.00 z=0.00 file=Line_002_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=2.50 y=35.00 z=0.00 file=Line_003_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

```

•
•
•

```
rec x=637.50 y=45.00 z=0.00 file=Line_511_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=638.75 y=45.00 z=0.00 file=Line_512_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=640.00 y=45.00 z=0.00 file=Line_513_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
fileio path=/home/matlab/guest/SW4/HomoGp125Corrected/HomoG1p25Results
```

Πρώτο στρωματωμένο μοντέλο

```
# This is an SW4 input file for the first Multi-Model
# First we set up a grid with a spacing h (=0.25->12.8
# points/minwavelength)
# over a domain (X x Y x Z).
# The material properties are given by the
# block commands. They describe a layer
# on top of a half-space in the z-direction
# The solution is recorded at different locations
# and saved in different usgs-files
# A single moment 15Hz point source is used with
# the time dependency being the RickerInt function
grid h=0.25 x=125 y=25 z=50
time t=0.2
#specify the width of the super grid damping layer (30 is the default)
#supergrid gp=30
# first define the material properties everywhere (half-space)
block vp=4000 vs=2300 rho=2300
# then define the slower material in the top layer (z < 5 m)
block vp=1400 vs=800 rho=1000 z2=5
# then define the slower material in the top layer (z < 3 m)
block vp=2100 vs=1200 rho=1200 z2=3
# then define the slower material in the top layer (z < 2 m)
# block vp=300 vs=180 rho=1800 z2=2
# lastly define the properties right at the interface, using harmonic avg for mu and lambda
# and arithmetic avg for rho
#block vp=1286.96 vs=386.09 rho=1800 z1=4.98 z2=5.02
# Ricker time function gives the velocities directly
# t0 = 13.5/omega =0.0043 < 0.05 avoids (most) startup transients
source x=25 y=12.5 z=0 mxx=1e15 myy=1e15 mzz=1e15 t0=0.02 freq=160 type=RickerInt
```

```
# Note that all recording stations are relative to the (0,0,0) origin
rec x=25.50 y=12.50 z=0.00 file=Line_001_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=26.00 y=12.50 z=0.00 file=Line_002_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=26.50 y=12.50 z=0.00 file=Line_003_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
•
•
•
rec x=124.00 y=12.50 z=0.00 file=Line_198_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=124.50 y=12.50 z=0.00 file=Line_199_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=125.00 y=12.50 z=0.00 file=Line_200_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

fileio path=/home/matlab/guest/SW4/MultiModel1/MultiModel1_Results
```

Δεύτερο στρωματωμένο μοντέλο

```
# This is an SW4 input file for the second Multi-Model
# First we set up a grid with a spacing h (=0.25->12.8
# points/minwavelength)
# over a domain (X x Y x Z).
# The material properties are given by the
# block commands. They describe a layer
# on top of a half-space in the z-direction
# The solution is recorded at different locations
# and saved in different usgs-files
# A single moment 15Hz point source is used with
# the time dependency being the RickerInt function
grid h=0.25 x=200 y=50 z=56
time t=1.5
#specify the width of the super grid damping layer (30 is the default)
#supergrid gp=30
# first define the material properties everywhere (half-space)
block vp=2800 vs=740 rho=2090
# then define the slower material in the top layer (z < 13.2 m)
block vp=2150 vs=603 rho=2020 z2=13.2
# then define the slower material in the top layer (z < 9.6 m)
block vp=1800 vs=485 rho=1960 z2=9.6
# then define the slower material in the top layer (z < 7.2 m)
```

```

block vp=1400 vs=367 rho=1910 z2=7.2

# then define the slower material in the top layer (z < 4.8 m)

block vp=750 vs=270 rho=1860 z2=4.8

# then define the slower material in the top layer (z < 2.4 m)

block vp=650 vs=194 rho=1820 z2=2.4

# lastly define the properties right at the interface, using harmonic avg for mu and lambda

# and arithmetic avg for rho

#block vp=1286.96 vs=386.09 rho=1800 z1=4.98 z2=5.02

# Ricker time function gives the velocities directly

# t0 = 13.5/omega =0.0043 < 0.05 avoids (most) startup transients

source x=10 y=25 z=0 mxx=1e15 myy=1e15 mzz=1e15 t0=0.1 freq=50 type=RickerInt

# Note that all recording stations are relative to the (0,0,0) origin

rec x=10.50 y=25.00 z=0.00 file=Line_001_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

rec x=11.00 y=25.00 z=0.00 file=Line_002_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

rec x=11.50 y=25.00 z=0.00 file=Line_003_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

      •
      •
      •

rec x=191.50 y=25.00 z=0.00 file=Line_363_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

rec x=192.00 y=25.00 z=0.00 file=Line_364_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

rec x=192.50 y=25.00 z=0.00 file=Line_365_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1


fileio path=/home/matlab/guest/SW4/MultiModel2/MultiModel2_Results

```

Τρίτο στωματωμένο μοντέλο

```

# This is an SW4 input file for the third Multi-Model

# First we set up a grid with a spacing h (=0.25->12.8

# points/minwavelength)

# over a domain (X x Y x Z).

# The material properties are given by the

# block commands. They describe a layer

# on top of a half-space in the z-direction

# The solution is recorded at different locations

# and saved in different usgs-files

# A single moment 15Hz point source is used with

# the time dependency being the RickerInt function

grid h=0.25 x=225 y=36 z=72

time t=1

```

```

#specify the width of the super grid damping layer (30 is the default)

#supergrid gp=30

# first define the material properties everywhere (half-space)

block vp=1800 vs=540 rho=2000

# then define the slower material in the top layer (z < 5 m)

block vp=1100 vs=330 rho=1600 z2=5

# lastly define the properties right at the interface, using harmonic avg for mu and lambda

# and arithmetic avg for rho

#block vp=1286.96 vs=386.09 rho=1800 z1=4.98 z2=5.02

# Ricker time function gives the velocities directly

# t0 = 1.35/omega =0.0043 < 0.05 avoids (most) startup transients

source x=36 y=18 z=0 mxx=1e15 myy=1e15 mzz=1e15 t0=0.1 freq=50 type=RickerInt

# Note that all recording stations are relative to the (0,0,0) origin

rec x=36.50 y=18.00 z=0.00 file=Line_001_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

rec x=37.00 y=18.00 z=0.00 file=Line_002_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

rec x=37.50 y=18.00 z=0.00 file=Line_003_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

      •
      •
      •

rec x=224.00 y=18.00 z=0.00 file=Line_376_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

rec x=224.50 y=18.00 z=0.00 file=Line_377_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

rec x=225.00 y=18.00 z=0.00 file=Line_378_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

fileio path=/home/matlab/guest/SW4/MultiModel3/MultiModel3_Results

```

Τέταρτο στρωματωμένο μοντέλο

```

# This is an SW4 input file for the fourth Multi-Model

# First we set up a grid with a spacing h (=0.25->12.8

# points/minwavelength)

# over a domain (X x Y x Z).

# The material properties are given by the

# block commands. They describe a layer

# on top of a half-space in the z-direction

# The solution is recorded at different locations

# and saved in different usgs-files

# A single moment 15Hz point source is used with

# the time dependency being the RickerInt function

grid h=0.25 x=235 y=50 z=50

```

```

time t=2

#specify the width of the super grid damping layer (30 is the default)
#supergrid gp=30

# first define the material properties everywhere (half-space)
block vp=1400 vs=360 rho=1800

# then define the slower material in the top layer (z < 14 m)
block vp=1400 vs=180 rho=1800 z2=14

# then define the slower material in the top layer (z < 6 m)
block vp=1000 vs=120 rho=1800 z2=6

# then define the slower material in the top layer (z < 2 m)
block vp=300 vs=180 rho=1800 z2=2

# lastly define the properties right at the interface, using harmonic avg for mu and lambda
# and arithmetic avg for rho
#block vp=1286.96 vs=386.09 rho=1800 z1=4.98 z2=5.02

# Ricker time function gives the velocities directly
# t0 = 1.35/omega =0.0043 < 0.05 avoids (most) startup transients
source x=47 y=25 z=0 mxx=1e15 myy=1e15 mzz=1e15 t0=0.1 freq=30 type=RickerInt

# Note that all recording stations are relative to the (0,0,0) origin
rec x=47.50 y=25.00 z=0.00 file=Line_001_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=48.00 y=25.00 z=0.00 file=Line_002_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=48.50 y=25.00 z=0.00 file=Line_003_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
      •
      •
      •

rec x=234.00 y=25.00 z=0.00 file=Line_374_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=234.50 y=25.00 z=0.00 file=Line_375_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1
rec x=235.00 y=25.00 z=0.00 file=Line_376_Rec_1 sacformat=0 usgsformat=1

fileio path=/home/matlab/guest/SW4/MultiModel4/Model4Results

```